

# **Revestimento de Chumaceiras com Ligas à Base de Estanho**

## **Caracterização da interface e estudo da adesão do revestimento ao substrato**

Trabalho apresentado para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

**Autor**

**José Pedro Pimentel de Almeida**

**Orientadores**

**Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra /Universidade de Coimbra

**Coimbra, dezembro 2014**



## AGRADECIMENTOS

Após uma longa etapa da minha carreira profissional, onde prestei os meus dotes técnicos através de uma grande experiência na área da metalomecânica, senti a necessidade de realizar um sonho que persistia comigo desde o início da minha atividade. Licenciarme em engenharia mecânica fazia parte da minha vida, pois o gosto pela área levava-me que existisse uma vontade excessiva para adquirir novas ideias, metodologias e técnicas de uma forma minuciosa. No entanto, os obstáculos eram imensos, conciliar os estudos com a vida profissional e conjugal acarretava enormes dificuldades. Mesmo assim, ao fim de três anos após ingressar no ensino superior, vi esse sonho realizado, e por isso, decidi continuar a enriquecer a minha formação, obtendo o grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Este trabalho de projeto é o culminar de uma longa escalada que só mesmo com muito esforço e dedicação me possibilitou concretizar o grande objetivo da minha vida. É lógico que tudo não teria acontecido sem a ajuda das pessoas que me rodearam, assim sendo, desde já, quero manifestar o meu profundo e sincero agradecimento.

A todos os docentes do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC pelo apoio, empenho e dedicação concedida durante o decorrer da minha Licenciatura e Mestrado.

Aos orientadores Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes e Doutor Fernando António Gaspar Simões pela enormíssima ajuda que me deram para definir os objetivos do trabalho, pela disponibilidade prestada para acompanharem os ensaios realizados, pela sabedoria e opinião crítica que transmitiram, por toda a orientação científica, pelas palavras de incentivo e pela simpatia demonstrada.

Ao futuro Eng. João Pedro, da empresa Cruz & Cruz, por providenciar diferentes tipos de amostras. Pela sua generosidade e amabilidade ao dispor os seus conhecimentos e equipamentos tecnológicos.

Aos meus Pais e Sogros, pelo carinho e pela força de motivação prestada para ultrapassar algumas adversidades.

À minha filha Ana Carolina pelo esforço e dedicação que teve para superar os estudos e a minha ausência em momentos cruciais da sua vida. Pelo amor e carinho que me concede todos os dias.

À minha filha Soraia, que nasceu nesta fase de conclusão do mestrado, pela alegria que me deu e pela sua ternura.

À minha esposa Maria de Lurdes pelo grandioso esforço adicional que teve para superar as tarefas diárias, nomeadamente para cuidar da Soraia e participar na educação da Ana Carolina. Pelos sacrifícios ultrapassados ao longo deste período de cinco anos e pelo encorajamento que me conferiu.



## RESUMO

As chumaceiras são exemplos de equipamentos industriais que necessitam de trabalhar juntamente com outras partes móveis para estabelecer movimento relativo entre si. A aplicação de revestimentos nas superfícies das chumaceiras onde existe movimento relativo tem como objetivo alterar as propriedades das superfícies. Os materiais utilizados no revestimento apresentam normalmente uma textura antifricção que permite baixar o coeficiente de atrito, de modo a atenuar o seu desgaste, sendo responsáveis por reduzir paragens frequentes das máquinas, devido à diminuta deformação mecânica que resulta dos movimentos de expansão/contração provocados pelas variações de temperatura.

O trabalho apresentado resultou da colaboração com a empresa Cruz & Cruz, com largos anos de experiência no revestimento de chumaceiras e da sua necessidade de aprofundar a compreensão dos mecanismos de adesão que se desenvolvem ao nível da interface substrato/revestimento, contribuindo assim para melhorar a adesão do revestimento à superfície da chumaceira. Neste estudo optou-se por utilizar substratos de aço não ligado com 0,2 % de carbono revestidos com uma liga à base de estanho, designada de metal Babbitt Tego V738. A deposição da liga sobre a superfície da chumaceira foi conseguida pela técnica de fundição por gravidade. Foram caracterizados dois tipos de interface, resultantes de processos distintos de preparação das superfícies dos substratos.

A partir de amostras devidamente preparadas foi efetuada uma caracterização microestrutural, através de microscopia ótica e microscopia eletrónica de varrimento, que permitiu estudar os microconstituintes que compõem o aço e o metal Babbitt, junto e afastado da interface. Foram caracterizados os diferentes materiais e identificados os elementos químicos que intervêm no mecanismo de adesão, destacando-se o estanho e o ferro. O efeito da alteração da superfície do substrato foi também avaliado através de ensaios mecânicos, nomeadamente dureza, microdureza e ensaios de tração.

Conclui-se desta forma a importância da difusão atômica entre o estanho presente no revestimento e a ferrite presente no substrato, revelando que os substratos devem apresentar na sua microestrutura, principalmente junto da interface, a predominância de fases ricas em ferro. A tensão necessária para separar o revestimento do substrato aumentou quando foi utilizado na preparação da superfície o processo de granalhagem, devido ao efeito da ligação mecânica criada pela existência de reentrâncias.

**Palavras-chave:** Metal Babbitt, Revestimento, substrato, adesão, interface, difusão.



## ABSTRACT

The bearings are industrial devices which need to work together with other moving parts to provide relative movement between themselves. The application of coating to bearing surfaces aims to alter the surface properties. The materials used in the coatings usually have an anti-friction texture, in order to reduce the friction coefficient and the wear. In this manner, are reduced the stops of equipment for repair the components.

This work was developed with the collaboration of Cruz & Cruz Company, once this company needs better understand the adhesion mechanism at the interface, among the substrate and the coating. In this study, substrates of plain carbon steel with 0.2% carbon was used and were coated with a tin-based alloy, known as Babbitt metal Tego V738. The deposition of the alloy on the surface of the bearing has been achieved by the gravity casting technique.

Optical microscopy and scanning electron microscopy were applied to study the microstructure at the interface of the substrate/coating. Different chemical elements have been identified as responsible for the adhesion mechanism, highlighting the role of tin and iron.

In order to understand the influence of the hardness in the interface adhesion, hardness and micro-hardness tests were conducted. It was observed that the hardness increases when approaching the interface. The stress required to separate the coating from the substrate was assessed using the tensile test. The adhesion increased, after modification the process of surface preparation.

It was proved the importance of atomic diffusion between the tin present in the coating, and the ferrite present in substrate. Therefore, the presence of iron rich phases in the substrate, particularly along the interface, are beneficial to enhance the adhesion.

The tension required to separate the coating from the substrate, increased when was used the shot peening surface preparation, due to the formation of recesses in the substrate surface.

**Keywords:** Metal Babbitt, coating, substrate, adhesion, interface, diffusion.





# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>SIMBOLOGIA.....</b>	<b>XV</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1. A CHUMACEIRA E O REVESTIMENTO .....	3
2.1.1. DESCRIÇÃO DE CHUMACEIRA.....	3
2.1.1.1. A IMPORTÂNCIA DO ALINHAMENTO DA CHUMACEIRA COM O VEIO.....	4
2.1.2. REVESTIMENTO SÓLIDO FUNCIONAL.....	5
2.2. REVESTIMENTOS METÁLICOS USADOS EM CHUMACEIRAS.....	6
2.2.1. REVESTIMENTO COM LIGAS DE COBRE.....	6
2.2.1.1. EXEMPLO DE UMA LIGA DE COBRE: O BRONZE .....	6
2.2.2. REVESTIMENTO COM LIGAS DE ALUMÍNIO.....	7
2.2.3. REVESTIMENTO COM CARBONETO DE TUNGSTÊNIO.....	8
2.2.4. REVESTIMENTO DE CARBONETO DE TUNGSTÊNIO COM CRÓMIO.....	8
2.2.5. REVESTIMENTO COM CARBONETO DE CRÓMIO.....	8
2.2.6. REVESTIMENTO COM NÍQUEL .....	8
2.2.7. REVESTIMENTO COM LIGAS DE ESTANHO E CHUMBO .....	9
2.2.7.1. LIGAS BABBITT À BASE DE ESTANHO (TIN-BASED).....	9
2.2.7.2. LIGAS BABBITT À BASE DE CHUMBO (LEAD-BASED).....	9
2.3. LIGAS DE METAL BABBITT .....	10
2.3.1. A HISTÓRIA DO METAL BABBITT .....	10
2.3.2. NORMALIZAÇÃO DAS LIGAS.....	11
2.3.3. PRODUÇÃO E RECICLAGEM DO METAL BABBITT .....	12
2.3.4. PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DO SUBSTRATO PARA REVESTIMENTOS POR FUNDIÇÃO .....	13
2.3.5. DEZ PASSOS PARA EFETUAR O REVESTIMENTO POR FUNDIÇÃO .....	13
2.3.6. TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO .....	14
2.3.6.1. DEPOSIÇÃO POR FUNDIÇÃO ESTÁTICA OU POR GRAVIDADE .....	14
2.3.6.2. DEPOSIÇÃO POR FUNDIÇÃO CENTRÍFUGA .....	15
2.3.6.3. DEPOSIÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA .....	16

2.3.6.3.1.	HVOF (HIGH VELOCITY OXY-FUEL)	17
2.3.6.3.2.	PULVERIZAÇÃO DO METAL BABBITT	18
2.3.6.4.	DEPOSIÇÃO POR ELETRODEPOSIÇÃO	19
2.3.6.4.1.	ELETRODEPOSIÇÃO DO METAL BABBITT	19
2.3.7.	CARATERIZAÇÃO DAS LIGAS	20
2.3.7.1.	MICROESTRUTURA	20
2.3.7.2.	PROPRIEDADES	20
2.3.7.3.	COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES: LIGA GRAU 2 (TIN-BASED) E GRAU 7 (LEAD-BASED)	22
2.3.7.4.	CORROSÃO E OXIDAÇÃO DO METAL BABBITT	23
2.3.7.5.	DESGASTE DO METAL BABBITT	24
2.3.8.	AVLIAÇÃO DA ADESÃO DO METAL BABBITT AO SUBSTRATO	24
2.4.	FENÓMENOS QUE OCORREM NA ADESÃO	25
2.4.1.	LIGAÇÃO QUÍMICA	25
2.4.2.	ADSORÇÃO FÍSICA	25
2.4.3.	ANGULO DE CONTACTO / MOLHAGEM	26
2.4.4.	BLOQUEIO MECÂNICO	27
2.4.5.	DIFUSÃO NO ESTADO SÓLIDO	27
2.4.5.1.	PROCESSOS TERMICAMENTE ATIVADOS	28
2.4.5.2.	MECANISMOS DE DIFUSÃO	29
2.4.5.3.	COEFICIENTE DE DIFUSÃO	30
2.4.6.	MECANISMO DE ADESÃO EM METAIS	31
2.4.6.1.	LIMPEZA E REATIVIDADE QUÍMICA	32
2.4.6.1.1.	SOLUÇÃO PIRANHA	33
<b>3.</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>35</b>
3.1.	COMPOSTO BIMETÁLICO AÇO/BABBITT	35
3.2.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS/PROVETES	36
3.3.	MICROSCOPIA ÓTICA	37
3.4.	MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO	38
3.5.	DUREZA VICKERS	39
3.5.1.	MICRODUREZA VICKERS	40
3.6.	ENSAIO DE TRAÇÃO	41
3.7.	RUGOSIDADE	43
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>45</b>
4.1.	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO COMPOSTO BIMETÁLICO-1	45
4.1.1.	BABBITT: MICROCONSTITUINTES E INTERMETÁLICOS	46
4.2.	ANÁLISE METALOGRÁFICA	49
4.2.1.	METALOGRAFIA DO BABBITT	49
4.2.2.	METALOGRAFIA DO AÇO	50
4.2.2.1.	METALOGRAFIA DO AÇO JUNTO DA INTERFACE	51
4.3.	ADESÃO	53
4.3.1.	INTERFACE OBSERVADA NO MICROSCÓPIO ÓTICO	53
4.3.2.	INTERFACE OBSERVADA EM MEV	54
4.3.2.1.	MECANISMO DE DIFUSÃO NA INTERFACE	55
4.4.	DUREZA DO COMPOSTO BIMETÁLICO-1	56
4.4.1.	MACRODUREZA JUNTO DA INTERFACE	57

---

4.4.2.	MICRODUREZA JUNTO DA INTERFACE.....	58
4.5.	MICRODUREZA NOS MICROCONSTITUINTES DO COMPOSTO BIMETÁLICO-1 .....	60
4.5.1.	MICRODUREZA DA MICROESTRUTURA DO AÇO.....	60
4.5.2.	MICRODUREZA NA MICROESTRUTURA DO METAL BABBITT .....	61
4.6.	PROPRIEDADES AVALIADAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	62
4.7.	RUGOSIDADE NA SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO-1 .....	65
4.8.	OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ADESÃO .....	66
4.8.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO APÓS OTIMIZAÇÃO .....	66
4.8.1.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO EM PROVETES DE BABBITT .....	68
4.8.2.	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA .....	69
4.8.2.1.	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO COMPOSTO BIMETÁLICO-2.....	69
4.8.2.2.	MICROESTRUTURA DO COMPOSTO BIMETÁLICO-2 – AÇO/BABBITT.....	70
4.8.2.3.	PERFIL E MICROESTRUTURA JUNTO DA INTERFACE.....	71
4.8.3.	FATORES QUE INFLUENCIAM A ADESÃO NO COMPOSTO-2 .....	74
4.8.3.1.	OUTROS ASPETOS FUNDAMENTAIS A REter NA ADESÃO DOS MATERIAIS .....	75
4.8.4.	DUREZA NO COMPOSTO BIMETÁLICO-2 .....	77
4.9.	COMPARAÇÃO ENTRE BIMETÁLICO-1 E BIMETÁLICO-2 .....	78
4.9.1.	PERFIL DAS INTERFACES.....	78
4.9.2.	MICROESTRUTURA DOS SUBSTRATOS .....	80
4.9.3.	DUREZA JUNTO DA INTERFACE .....	81
4.9.4.	TENSÃO DE ROTURA .....	81
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>83</b>
5.1.	CONCLUSÃO.....	83
5.2.	TRABALHOS FUTUROS .....	84
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>85</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modos de carregamento da chumaceira em resultado dos esforços aplicados no veio. Adaptada: (Stoeterau 2004). .....	3
Figura 2.2 - (a) Chumaceiras em meia-lua e (b) chumaceiras em casquilho. Adaptada: (Cruz & Cruz 1981). .....	4
Figura 2.3 - Exemplo de desalinhamento entre eixos. Adaptada: (Furtado 2010). .....	4
Figura 2.4 - Desalinhamento entre chumaceira e veio. (Termomecânica São Paulo s.d.). .....	5
Figura 2.5 - Revestimento sólido entre chumaceira e veio. ....	5
Figura 2.6 - Ligas à base de cobre. Adaptada: (Júnior s.d.). .....	6
Figura 2.7 - Metal Babbitt na forma de arame (a) e (b) lingotes. Adaptada: (All-biz 2010-2014). .....	12
Figura 2.8 - Deposição de material por gravidade (Gingery 2001). ....	15
Figura 2.9 - Dispositivo de suporte com rotação (DSE Bearing Co.,Ltd 2011). ....	16
Figura 2.10 - Alimentação do metal base na fundição centrífuga (DSE Bearing Co.,Ltd 2011). .....	16
Figura 2.11 - Princípio da técnica de revestimento por aspersão térmica. (Eutectic Castolin 2011). .....	17
Figura 2.12 - Ligas utilizadas e variantes da aspersão térmica. (Eutectic Castolin 2011). ....	17
Figura 2.13 - Princípio de funcionamento do Processo HVOF. (Sulzer s.d.). ....	18
Figura 2.14 - Exemplo de eletrodeposição com um ânodo de ouro e um cátodo de alumínio. Adaptada: (Alunos online 2011). .....	19
Figura 2.15 - Microestrutura do Babbitt. Alterada: (George e Glacier 1992). .....	20
Figura 2.16 - Resistência à compressão das ligas Babbitt em função da temperatura (DeHart, A. O. 1983). .....	21
Figura 2.17 - Efeito da espessura na vida do Babbitt à fadiga (DeHart, A. O. 1983). .....	22
Figura 2.18 - Ângulo de contacto entre um líquido e um sólido. Alterada: (Alhanati s.d.). ....	26
Figura 2.19 - Par de difusão cobre e níquel. (Callister e Rethwisch 2012). ....	27
Figura 2.20 - Resultado da difusão do cobre e níquel e respetivas concentrações. (Callister e Rethwisch 2012). ....	28
Figura 2.21 - (a) Representação do processo de difusão termicamente ativado; (b) Declive da reta descrita pela equação de Arrhenius. (Padilha 2000). .....	29
Figura 2.22 - Mecanismo de autodifusão (difusão substitucional) (Callister e Rethwisch 2012). .....	29
Figura 2.23 - Mecanismo de difusão intersticial. (Callister e Rethwisch 2012). .....	30
Figura 2.24 - Transferência de metal na interface de uma ligação sujeita a um esforço de separação. (Stachowiak e Batchelor 2000). .....	31
Figura 2.25 - Coeficiente de adesão versus dureza. (Stachowiak e Batchelor 2000). ....	32
Figura 3.1 - Material fornecido pela empresa Cruz & Cruz para caracterização. ....	35
Figura 3.2 - (a) Corte das amostras no serrote mecânico (b) Amostras/provetes para ensaios. ....	35
Figura 3.3 - (a) Fresadora e (b) retificadora plana. ....	36
Figura 3.4 - (a) Resina epóxi epomet e (b) máquina de compactação. ....	36
Figura 3.5 - Método de pré-preparação das amostras. ....	37
Figura 3.6 - (a) Máquina de polir (Buehler) e (b) amostra atacada quimicamente com reagente de nital. ....	37
Figura 3.7 - Microscópio ótico com ampliação até 1000X. ....	38
Figura 3.8 - Hitachi SU-70 (Hitachi 2014). ....	38
Figura 3.9 - (a) Equipamento para medição da dureza; (b) Trajetória de medição da dureza; (c) Indentação correspondente a uma carga de 1Kgf; (d) Interface Aço/Babbitt. ....	39
Figura 3.10 - Microdurómetros utilizados nos ensaios de dureza. ....	40
Figura 3.11 - Equipamento de tração com carga máxima de 2000 kgf. ....	41
Figura 3.12 - Garra à esquerda e provete separado após ensaio de tração. ....	42
Figura 3.13 - (a) Máquina de tração, (b) provetes de metal Babbitt e (c) garras de aperto com extensómetro. ....	42
Figura 3.14 - Rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo SurfTest SJ-201P. ....	43
Figura 4.1 - Contornos a amarelo identificam a zona de análise química. ....	45
Figura 4.2 - Projeção líquida Cu-Sb-Sn (ASM 1992). ....	47

Figura 4.3 - Fases de Cu-Sb-Sn, reações no estado sólido (ASM 1992).	47
Figura 4.4 - Porção do diagrama de fases Cu-Sb-Sn (Glaeser 1992).	48
Figura 4.5 - Parte de diagrama ternário Cd-Sb-Sn (ASM 1992).	48
Figura 4.6 - Parte de diagrama ternário Cd-Sb-Sn a 20 °C. Adaptado: (ASM 1992).	49
Figura 4.7 - Agulhas de $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ e partículas cúbicas de SbSn (ambos branco) observadas na amostra de Babbitt.	50
Figura 4.8 - Microestrutura do aço St52, pertencente ao composto bimetálico-1.	51
Figura 4.9 - Estado da microestrutura obtida por microscopia ótica junto da interface.	52
Figura 4.10 - Distribuição da perlite ao longo da interface.	52
Figura 4.11- Microscopia ótica junto da interface (aço/Babbitt).	53
Figura 4.12 - Ampliação da interface do composto bimetálico-1 – MEV 50X, sem ataque químico.	54
Figura 4.13 - Aspeto da Interface (Aço/Babbitt) – MEV 10000X.	54
Figura 4.14 - Difusão do Ferro no Babbitt - MEV_EDS 10000X.	55
Figura 4.15 - Ferro (cor vermelha) a difundir no estanho (cor verde) - MEV_EDS 10000X.	55
Figura 4.16 - Diagrama binário Fe-Sn (ASM 1992).	56
Figura 4.17 - Média e desvio padrão da dureza.	57
Figura 4.18 - Valor da dureza nos 5 pontos.	58
Figura 4.19 - Indentações realizadas no aço e no Babbitt com carga de 50g.	58
Figura 4.20 - Microdureza junto da interface no aço e no Babbitt com carga de 50g.	59
Figura 4.21 - Pontos avaliados na microdureza com carga de 50g a 15s.	60
Figura 4.22 - Indentações nos intermetálicos $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ e SbSn, junto e afastado da interface.	62
Figura 4.23 -Curvas força vs alongamento obtidas com ensaio de tração.	63
Figura 4.24 - Curvas de tensão nominal vs deslocamento.	64
Figura 4.25 - Provete separado e perfil de rugosidade do substrato.	65
Figura 4.26 - Resultados das forças obtidas nos ensaios após modificação da superfície do aço.	66
Figura 4.27 - Curvas tensão vs deslocamento no composto bimetálico-2.	67
Figura 4.28 - Zonas de fratura após ensaios de tração (a) referentes às primeiras condições de deposição (b) referentes às segundas condições de deposição.	68
Figura 4.29 - Curvas tensão/deformação registados nos 3 provetes de metal Babbitt.	68
Figura 4.30 - Contornos a amarelo identificam a zona de análise química.	70
Figura 4.31 - Microestrutura do composto bimetálico-2 – Aço/Babbitt.	71
Figura 4.32 - Microestrutura junto da interface-2 com reentrâncias.	71
Figura 4.33 - Altura e comprimento das asperezas no composto bimetálico-2.	72
Figura 4.34 - Exemplo de uma roca a desbastar o substrato e morfologia obtida na superfície.	72
Figura 4.35 - Perfil de rugosidade na interface-2.	73
Figura 4.36 - Intermetálicos de SbSn e $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ na interface-2.	74
Figura 4.37 - Pormenor da interface no composto bimetálico-2.	74
Figura 4.38 - Distorção dos grãos e aspeto da perlite junto da interface-2.	75
Figura 4.39 - MEV e respetivo mapa de distribuição de EDS para o aço com o Babbitt.	75
Figura 4.40 - Dureza do composto bimetálico-2 junto da interface com carga de 50g.	77
Figura 4.41 - Dureza do composto bimetálico-1 junto da interface com carga de 50g.	78
Figura 4.42 - (a) Perfil da interface-1 e (b) Perfil da interface-2.	79
Figura 4.43 - Perfil de rugosidade na face (x) da interface-1.	79
Figura 4.44 - Perfil de rugosidade na face (y) da interface-1.	79
Figura 4.45 - Perfil de rugosidade na face (y) da interface-2.	79
Figura 4.46 - Perfil de rugosidade na face (x) da interface-2.	80
Figura 4.47 - (a) Microestrutura do composto bimetálico-1 e (b) Microestrutura do composto bimetálico-2.	80
Figura 4.48 - (a) Perlite do composto bimetálico-1 e (b) Perlite do composto bimetálico-2.	80
Figura 4.49 - Dureza junto da interface com carga de 50g.	81
Figura 4.50 - Curvas de tensão nominal vs deslocamento.	81

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes de atrito (Sulcromo s.d., Applied s.d.) .....	7
Tabela 2.2 - Comparação de diferentes revestimentos utilizados em chumaceiras. (Rijeza Metalurgia s.d.). .....	7
Tabela 2.3 - Limite de velocidade relativa entre o veio e chumaceira e carga aplicada (Tecém 2013).....	9
Tabela 2.4 - Composição química em peso das ligas à base de estanho, especificadas na norma ASTM B-23 (Tecém 2013).....	11
Tabela 2.5 - Composição química em peso das ligas à base de chumbo, especificadas na norma ASTM B-23 (Tecém 2013).....	11
Tabela 2.6 - Valores típicos de resistência à fadiga para materiais em rotação (DeHart, A. O. 1983).....	21
Tabela 2.7 - Propriedades mecânicas da liga de grau 2 de acordo com a temperatura de utilização (Behr Iron & Metal s.d., George e Glacier 1992).....	22
Tabela 2.8 - Propriedades mecânicas da liga de grau 7 de acordo com a temperatura de utilização (Behr Iron & Metal s.d.).....	23
Tabela 2.9 - Propriedades mecânicas das ligas de grau 2 e 7 (Ashby M. 2011).....	23
Tabela 2.10 - Propriedades térmicas das ligas de grau 2 e 7 (Ashby M. 2011).....	23
Tabela 2.11 - Energias e comprimentos de ligação (Silva, Magalhães e Moura 2007). .....	26
Tabela 2.12 - Coeficientes de difusão em vários sistemas (Callister e Rethwisch 2012). .....	30
Tabela 4.1 - Composição química do Aço St 52 - MEV. ....	45
Tabela 4.2 - Composição química do Metal Babbitt – MEV. ....	46
Tabela 4.3 - Média e desvio padrão em cada ponto.....	57
Tabela 4.4 - Dureza dos microconstituintes a 0,2 mm da interface. ....	61
Tabela 4.5 - Valores da força e deslocamento registados em pontos específicos durante os cinco ensaios realizados. ....	63
Tabela 4.6 - Valores das tensões nominais para cada ponto.....	64
Tabela 4.7 - Valores de rugosidade nos cinco provetes.....	65
Tabela 4.8 - Valores das tensões após otimização.....	67
Tabela 4.9 - Composição química do substrato-2 – Aço St 52 – MEV.....	69
Tabela 4.10 - Composição química do revestimento-2 – Metal Babbitt – MEV.....	70
Tabela 4.11 - Valores da rugosidade em 5 pontos do substrato-2. ....	73
Tabela 4.12 - Comparação entre os principais elementos que compõem o composto.....	76





## SIMBOLOGIA

A – Área  
A – Área de contacto  
C – Concentração  
c – Constante  
D – Coeficiente de difusão  
Do – Fator pré-exponencial  
E – Espessura  
eV – Eletrão-volt  
F – Força  
g – Grama  
J – Joule  
K – Graus Kelvin  
kgf – Quilograma força  
kV – quilovolts  
L – Largura  
M – Matéria  
MPa – Mega Pascal  
N – Newton  
Q – Energia de ativação para difusão  
QQ-T-390A – Especificações do Governo dos EUA  
R – Constante dos gases perfeitos  
Ra – Rugosidade média  
Rq – Rugosidade média quadrática  
Rz – Rugosidade de profundidade média  
T – Temperatura absoluta  
u – Unidade de massa atômica  
V – Velocidade da reação ou transformação  
μm – Micro  
σ – Tensão  
φ – Fi



## ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana de Testes e Materiais  
CCC – Cubica de Corpo Centrada  
CFC – Cubica de Faces Centradas  
DEM – Departamento de Engenharia Mecânica  
DIN – Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemão para Normatização  
EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-x  
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
FPM – Feet per minute - Pés por minuto  
HB – Hardness Brinell - Dureza Brinell  
HC – Hexagonal Compacta  
HRC – Hardness Rockwell C - Dureza Rockwell C  
HV – Hardness Vickers - Dureza Vickers  
HVOF – High Velocity Oxi-Fuel - Alta velocidade de oxigénio e combustível  
ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra  
ISO – International Organization for Standardization - Organização internacional para a normalização  
MEV – Microscopia Eletrónica de Varrimento  
PSI – Pound force per square inch - Libra força por polegada quadrada  
PTA – Plasma de Arco Transferido  
PVD – Physical Vapour Deposition - Deposição física em fase de vapor  
SAE – Society of Automotive Engineers - Sociedade de engenheiros da área automóvel



## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais animados de movimento estão sujeitos a uma variedade de fatores que podem evidenciar alterações do seu estado inicial. Quando há contacto ou movimento de um sólido em relação a outro sólido, líquido ou gás, existe tendencialmente uma perda progressiva de partículas a partir da sua face de trabalho.

As chumaceiras são exemplos de equipamentos industriais que necessitam de trabalhar juntamente com outras partes móveis para estabelecer movimento relativo entre si. Esse movimento é produzido pela rotação existente entre as diversas partes, podendo originar ao fim de algum tempo efeitos de degradação, como por exemplo o desgaste.

O desgaste é uma perda substancial do material que pode ser provocado por diversos fatores, tais como: corrosão, adesão, abrasão ou erosão. Estes originam danos irreparáveis nas superfícies quando não são detetados atempadamente.

A aplicação de revestimentos nas superfícies das chumaceiras onde existe movimento relativo tem como objetivo alterar as propriedades das superfícies, conferir um aumento da resistência ao desgaste e capacidade para resistir à corrosão. A sua utilização permite, prolongar a durabilidade das chumaceiras, pois suprime o contato direto entre os componentes fixos e os componentes móveis. Normalmente apresentam uma textura antifricção que permite baixar o coeficiente de atrito de modo a atenuar o seu desgaste. São responsáveis por reduzir paragens frequentes das máquinas, devido à diminuta deformação mecânica que resulta dos movimentos de expansão/contração provocados pelas variações de temperatura.

Existe no mercado uma enorme diversidade de revestimentos, contudo este trabalho está direcionado para o estudo dos revestimentos formados a partir de ligas macias não ferrosas, à base de estanho, contendo também antimónio e cobre, cuja microestrutura é composta por compostos intermetálicos relativamente duros, dispersos numa matriz macia. Estas ligas são habitualmente designadas por metal Babbitt, sendo conhecidas por apresentarem um coeficiente de atrito baixo, com características essenciais para garantir o movimento. Tendo em conta as propriedades que os revestimentos apresentam, estes são também conhecidos pela designação de metal antifricção.

O trabalho desenvolvido resultou da colaboração com a empresa Cruz & Cruz (Cruz & Cruz 1981) sediada na Figueira da Foz, experiente fundição de ligas antifricção para chumaceiras. Este trabalho surgiu da necessidade por parte da empresa de aprofundar o conhecimento dos mecanismos de adesão que se desenvolvem ao nível da interface substrato/revestimento, de forma a melhorar a adesão do revestimento à superfície da chumaceira. Entre os muitos materiais utilizados pela empresa nas chumaceiras e nos revestimentos, selecionou-se para este trabalho um substrato de aço não ligado com 0,2 % de carbono, o qual foi revestido com a liga de metal Babbitt Tego V738 (81% de Sn, 12% Sb, 5.5% Cu, 1.2% Cd e 0.3% Ni).

O revestimento do aço com a liga Babbitt foi efetuado pela empresa Cruz & Cruz utilizando para o efeito a técnica de fundição por gravidade.

### **1.1. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo caracterizar um material formado por um substrato em aço (metal base) e um revestimento de metal Babbitt, com o intuito de perceber os possíveis fatores que possam influenciar o mecanismo de adesão na interface substrato/revestimento. É importante salientar que o revestimento faz parte da chumaceira, pois este é adicionado de modo a aderir na sua face de trabalho, originando uma única peça formada por dois materiais distintos. Por este motivo, é comum afirmar que as chumaceiras são órgãos bimetálicos.

### **1.2. Estrutura do trabalho**

De modo a facilitar a compreensão do tema abordado, o presente trabalho está dividido em quatro capítulos principais.

Após este primeiro capítulo onde é realizado um enquadramento do trabalho, no capítulo dois é apresentada uma revisão bibliográfica que descreve as chumaceiras, o modo de funcionamento e as técnicas usadas para o seu desempenho. É também realizada uma abordagem aos revestimentos sólidos funcionais usados em chumaceiras e ao metal Babbitt, onde são realçadas as suas características e funcionalidades. É também explanada a teoria da adesão e mencionados os vários mecanismos envolvidos neste processo, ilustrando a sua complexidade e os fatores que podem influenciar a sua performance.

O capítulo três descreve a metodologia utilizada para caracterizar o composto (Aço/Babbitt), especificando os procedimentos de execução das amostras/provetes e as técnicas usadas para obtenção dos resultados inerentes ao processo experimental.

Por fim, o capítulo quatro expõe os resultados obtidos na caracterização realizada, onde se realçam os mecanismos de adesão entre o substrato de aço e o revestimento de metal Babbitt.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A chumaceira e o revestimento

A chumaceira é um componente mecânico constituinte de muitos dos equipamentos industriais, ao qual compete manter o movimento mecânico do sistema. A chumaceira é montada de modo a suportar a carga transmitida por um veio (ou outro elemento) e simultaneamente criar e manter as condições adequadas para que ocorra o movimento relativo (de rotação na maioria dos casos) do veio. O processo de fabrico destes componentes obriga a existência de técnicas especiais de maquinação, especialmente na face de trabalho que deve conter baixo coeficiente de atrito e baixa rugosidade, para evitar danos no sistema. No mercado podem ser encontradas chumaceiras construídas a partir de um ou mais materiais. Os revestimentos superficiais funcionais são materiais que procuram satisfazer essas exigências, aderem com facilidade nas faces internas das chumaceiras, formando um composto bimetálico (chumaceira/revestimento) capaz de conferir as propriedades desejadas ao sistema.

#### 2.1.1. Descrição de chumaceira

Para Pike e Conway (Pike e Conway 1992) “as chumaceiras são projetadas para transmitir força entre duas superfícies que contêm movimento relativo. As formas mais simples de chumaceiras são usadas sem lubrificação e, portanto, são penalizadas pelo alto atrito e desgaste”. Estes elementos mecânicos são caracterizados por serem capazes de suportar esforços axiais, radiais ou em várias direções (Figura 2.1), provocados por cargas provenientes de outros elementos (Stoeterau 2004).

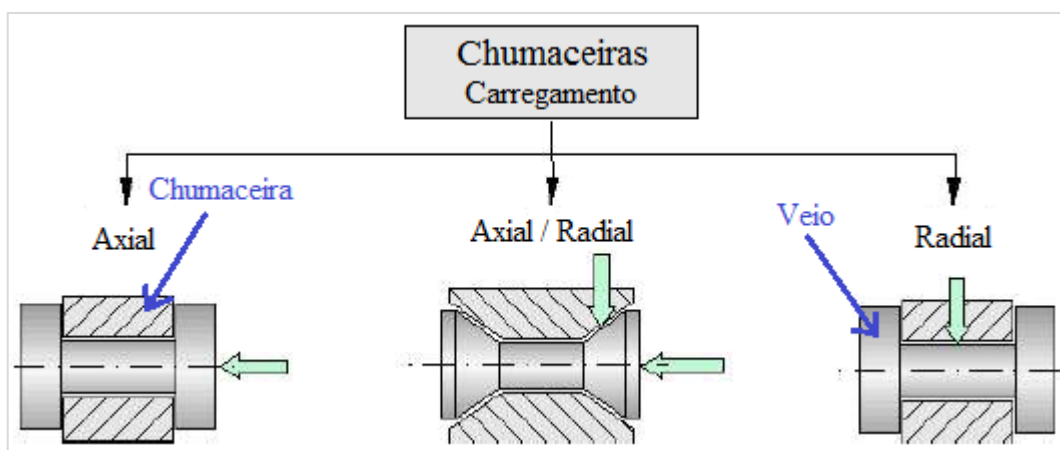


Figura 2.1 - Modos de carregamento da chumaceira em resultado dos esforços aplicados no veio. Adaptada: (Stoeterau 2004).

Para Stoeterau (Stoeterau 2004) as chumaceiras podem ser definidas por elementos de máquinas em contato onde só existe movimento de rotação entre a chumaceira e o veio. Ou

seja; o movimento de translação em qualquer outra direção deve ser evitado reduzindo-se ao máximo.

Pode dizer-se que estes componentes mecânicos apresentam uma forma tipo meia-lua ou casquilho (Figura 2.2), permitindo acoplar no seu interior um veio/eixo, de modo a promover o movimento de rotação. O movimento pode ser dificultado pelo atrito existente nas superfícies em contacto, provocando um aumento de temperatura e consequentemente o aparecimento do fenómeno designado por desgaste. O mecanismo de desgaste depende da intensidade do contacto, enquanto o calor gerado por atrito depende da carga, da velocidade e do coeficiente de atrito.



Figura 2.2 - (a) Chumaceiras em meia-lua e (b) chumaceiras em casquilho. Adaptada: (Cruz & Cruz 1981).

O desempenho do movimento circular é substancialmente afetado pelo regime de lubrificação, que pode ser dividido em três categorias (Pike e Conway 1992):

- ✓ Fricção (Lubrificação a seco ou fronteira);
- ✓ Filme completo (Superfícies separadas por película lubrificante);
- ✓ Filme misto (Carga em parte realizada por fricção e em parte por filme de fluido).

#### 2.1.1.1. A importância do alinhamento da chumaceira com o veio

O alinhamento da chumaceira com o veio é de extrema importância, porque o desalinhamento origina esforços adicionais ao sistema, como se pode verificar na Figura 2.3, onde se observa o desalinhamento entre o eixo acionador e o acionado.



Figura 2.3 - Exemplo de desalinhamento entre eixos. Adaptada: (Furtado 2010).



Estes esforços originam uma flexão no veio com tendência a desgastar as extremidades das chumaceiras, permitindo assim, que o revestimento se acomode formando uma face paralela ao eixo (Figura 2.4). Nestes casos, a diminuição da área de contacto é evidente, levando que as tensões superficiais aumentem e a rutura do revestimento apareça com facilidade.

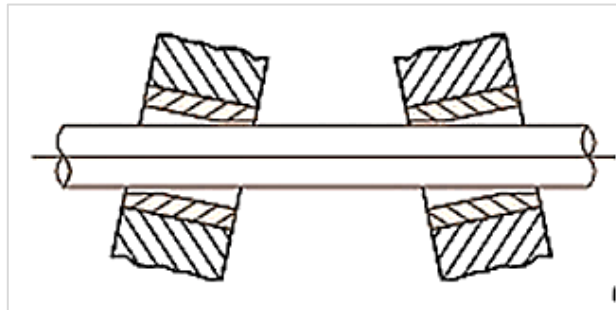


Figura 2.4 - Desalinhamento entre chumaceira e veio. (Termomecânica São Paulo s.d.).

### 2.1.2. Revestimento sólido funcional

Como o nome indica, revestimento é um processo designado para revestir algo, protegendo-o de diversos fatores que alterem a sua natureza superficial, i.e. física ou química. É aplicado para cobrir totalmente ou parcialmente uma superfície, de uma forma decorativa, funcional ou ambas (Wikipedia 2010).

Os revestimentos funcionais aplicados em chumaceiras são utilizados para facilitar o movimento relativo entre superfícies. A sua textura e o baixo coeficiente de atrito conferem propriedades mecânicas capazes de proporcionar um desgaste controlado. Para chumaceiras, ou outro equipamento que trabalhe em simultâneo e cujos custos de fabricação sejam elevados, os revestimentos funcionais são uma opção vantajosa, permitindo protege-los de danos irreparáveis causados pelo sistema.

A Figura 2.5 esquematiza uma chumaceira com um veio central separado pelo revestimento, o movimento relativo é formado entre a superfície do veio e a do revestimento.

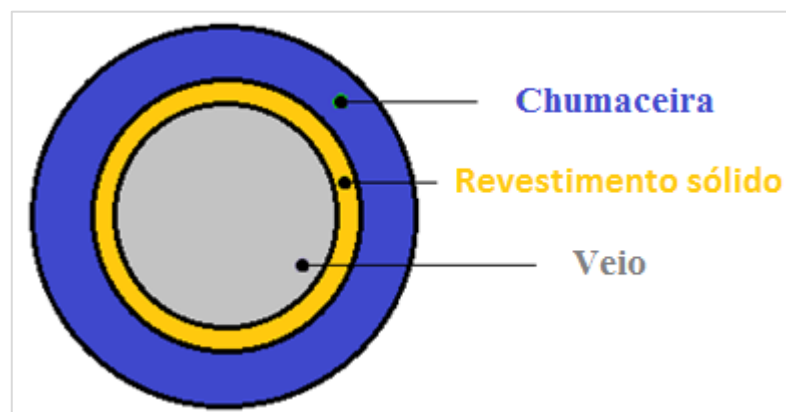


Figura 2.5 - Revestimento sólido entre chumaceira e veio.

## 2.2. Revestimentos metálicos usados em chumaceiras

### 2.2.1. Revestimento com ligas de Cobre

O cobre apresenta uma estrutura cristalina de CFC e encontra-se no estado sólido à temperatura ambiente, com massa volúmica de  $8930 \text{ kg/m}^3$  a  $20^\circ\text{C}$  (Barralis e Maeder 2005).

Bronze, latão, cuproalumínio e cuproníquel são as principais ligas provenientes do cobre (Figura 2.6). Hoje em dia, pode encontrar-se uma grande diversidade de chumaceiras revestidas com ligas de cobre. As buchas auto-lubrificantes, os casquilhos para bielas (Bronzina) e as guias de deslizamento para moldes são alguns exemplos de equipamentos que não dispensam a sua aplicação.

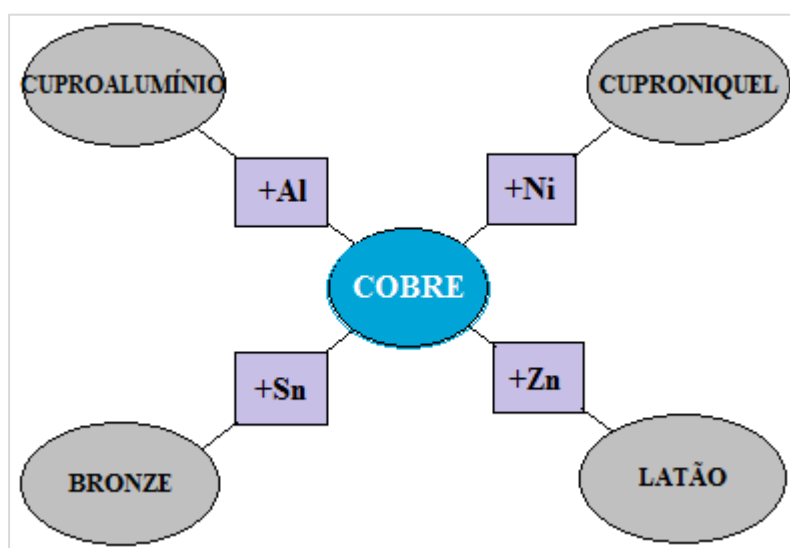


Figura 2.6 - Ligas à base de cobre. Adaptada: (Júnior s.d.).

No entanto, o cobre também pode fazer parte da composição de outros materiais. Analisando a composição química das ligas de Babbitt à base de estanho, verifica-se que estas apresentam uma percentagem significativa de cobre. Este elemento permite melhorar as características destas ligas devido à formação de compostos intermetálicos ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) provenientes da sua ligação ao estanho (Glaeser 1992, ASM 1992, Júnior s.d.).

#### 2.2.1.1. Exemplo de uma liga de cobre: O bronze

Quando o estanho (Sn de 3 a 20%) é adicionado ao cobre (Cu) origina uma liga simples que se divide em duas categorias (Barralis e Maeder 2005):

- ✓ O bronze  $\alpha$  que é maleável a quente e a frio, capaz de aumentar as suas propriedades mecânicas com o teor em estanho (% Sn entre x-y).
- ✓ O bronze  $\alpha + \delta$  que é normalmente usado em fundição, onde as suas propriedades variam com a percentagem da fase  $\delta$  (% Sn entre x-y).

Os bronzes utilizados em chumaceiras são os que contêm 10% ou mais de estanho, apresentam boa resistência mecânica e excelente resistência ao desgaste (Infomet 1998). Os átomos de estanho são relativamente maiores que os de cobre, no entanto essa característica não impede que o processo de solubilidade seja eficaz, sendo até elevadíssimo, o que proporciona uma excelente resistência mecânica e elevada dureza nas ligas de bronze (Infomet 1998).

### 2.2.2. Revestimento com ligas de Alumínio

As ligas de alumínio (Al) apresentam características diferentes das de cobre. São caracterizadas por conterem menor densidade, menor resistência mecânica e maior coeficiente de atrito (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Coeficientes de atrito (Sulcromo s.d., Applied s.d.).

Materiais em contacto		Estático s/ lubrificação	Deslizamento s/ lubrificação	Estático c/ lubrificação	Deslizamento c/ lubrificação
Aço duro	Babbitt	0,42-0,7	0,33-0,35	0,08-0,25	0,05-0,16
Alumínio	Alumínio	1,90	1,40	.	.
Alumínio	Aço médio C	0,61	0,47	.	.
Aço	Latão	0,35	.	0,19	.
Aço médio C	Aço médio C	0,74	0,57	.	.
Aço médio C	Chumbo	0,95	0,95	0,50	0,30
Aço médio C	Ferro fundido	.	0,23	0,18	0,13
Bronze	Aço	.	.	0,16	.
Bronze	Ferro fundido	.	0,22	.	.

Na Tabela 2.2 representa-se a comparação das características de diferentes materiais utilizados em revestimentos, sendo claro que o desempenho do alumínio em revestimentos é desaconselhado, por não resistir à abrasão e erosão.

Tabela 2.2 - Comparação de diferentes revestimentos utilizados em chumaceiras. (Rijeza Metalurgia s.d.).

Revestimento	Espessura	Dureza	Resistência à Abrasão	Resistência à Corrosão	Resistência à Erosão
Carboneto de Tungstênio	< 0,5mm	1200 a 1350 HV	Ótimo desempenho	Não indicado	Ótimo desempenho
Carboneto de Tungstênio-Crômio	< 0,5mm	1200 a 1350 HV	Ótimo desempenho	Ótimo desempenho	Ótimo desempenho
Carboneto de Crômio	< 0,5mm	1000 a 1200 HV	Ótimo desempenho	Ótimo desempenho	Ótimo desempenho
Níquel	< 1mm	60 a 65 HRC	Bom desempenho	Bom desempenho	Não Indicado
Alumínio	> 3mm	25 a 30 HRC	Não Indicado	Ótimo Desempenho	Não Indicado

No entanto, devido à formação de uma camada de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na sua superfície, revela melhor resistência à corrosão, tornando-o essencial para outras aplicações (Barralis e Maeder 2005).

### **2.2.3. Revestimento com carboneto de tungstênio**

Embora o carboneto de tungstênio (WC) pertença à classe dos materiais cerâmicos, este tipo de revestimento está referenciado pela Rijeza Metalurgia de revestimento metálico. Tem a particularidade de ser bastante resistente à erosão e à abrasão, com uma dureza até 1350 HV (Tabela 2.2) e possui uma adesão bastante elevada, na ordem dos 68,948 MPa. A sua utilização é aconselhada a temperaturas inferiores a 540°C e em ambientes que não tenham problemas de corrosão salina ou ácida. Devido à sua limitação à resistência à corrosão, não deve ser aplicado em revestimentos para situações corrosivas, devendo normalmente ser utilizado em chumaceiras com lubrificação (Rijeza Metalurgia s.d.).

### **2.2.4. Revestimento de carboneto de tungstênio com crómio**

O revestimento de carboneto de tungstênio (WC) com crómio (Cr) é altamente resistente à abrasão, erosão e desgaste por deslizamento. Por isso, é bastante recomendado para resistir à corrosão marinha e em solicitações de temperaturas até os 500°C. Não gera danos ambientais, tem uma dureza muito elevada (1350 HV) (Tabela 2.2) e uma resistência à corrosão de 4500 horas dentro de câmara de nevoeiro salino (Rijeza Metalurgia s.d.).

### **2.2.5. Revestimento com carboneto de crómio**

Os revestimentos de carboneto de crómio ( $\text{Cr}_x\text{C}_y$ ) possuem excelente dureza (1100 HV) (Tabela 2.2), elevada resistência à corrosão salina e enorme adesão com fixação de 68,948 MPa (Rijeza Metalurgia s.d.). São indicados para trabalhar acima dos 500°C, por apresentarem um aumento de dureza com o aumento de temperatura, ou seja, são ideais para trabalhar a elevadas temperaturas e ainda em situações que exijam grande resistência à corrosão.

### **2.2.6. Revestimento com níquel**

Com uma camada inferior a um milímetro de espessura, o níquel (Ni) proporciona excelente resistência ao desgaste por corrosão, abrasão e erosão em elevadas temperaturas (acima dos 500°C). Possui elevada dureza, na ordem dos 60 a 65 HRC (Tabela 2.2), mas para temperaturas abaixo de 400°C não é indicado para suportar desgaste abrasivo. Esta liga depois de aplicada é fundida na superfície, proporcionando uma excelente união com o metal base, o que origina um aumento da sua vida útil, superior a 500%, comparando com outros revestimentos tradicionais (Rijeza Metalurgia s.d.).

### 2.2.7. Revestimento com ligas de estanho e chumbo

Os revestimentos formados por ligas onde o estanho ou o chumbo predomine são normalmente designados de metal Babbitt.

Estes dividem-se em dois grupos conforme a seguinte classificação:

- ✓ As ligas à base de estanho (Tin-Based)
- ✓ As ligas à base de chumbo (Lead-Based)

A Tabela 2.3 mostra a velocidade linear do eixo em contacto com o revestimento de metal Babbitt e a respetiva carga suportada pelo referido revestimento (Tecém 2013).

Tabela 2.3 - Limite de velocidade relativa entre o veio e chumaceira e carga aplicada (Tecém 2013).

Babbitt Classificação	LIMITES			
	Velocidade [m/s]		Carga [kg]	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Babbitts Tin-Based	5,08	12,2	0	907
Babbitts Lead-Based	0,51	5,08	0	227

#### 2.2.7.1. Ligas Babbitt à base de estanho (Tin-Based)

O Babbitt à base de estanho é o mais indicado para ambientes corrosivos, sendo composto por uma grande percentagem de estanho (mais ou menos 86%), e outros metais, como o cobre e o antimónio, que conferem um aumento na sua resistência (DeHart, A. O. 1983). Para situações em que a alta velocidade entre o veio e a chumaceira seja um fator relevante e que haja dificuldade de lubrificação, as ligas Babbitt à base de estanho são as mais indicadas (Tecém 2013). Podem ser depositadas em diversos substratos, como por exemplo o aço, bronze, latão e o ferro fundido. Têm características que conferem boa resistência à fadiga e ao desgaste. Normalmente são utilizadas em chumaceiras, turbinas e bielas. Comparadas com as ligas à base de chumbo, estas apresentam custos mais elevados (DeHart, A. O. 1983).

#### 2.2.7.2. Ligas Babbitt à base de chumbo (Lead-Based)

A escassez do estanho devido à Segunda Guerra Mundial forçou a utilização das ligas à base de chumbo. O seu desempenho foi surpreendente, pois superou em algumas situações a utilização do estanho. Após vários testes realizados, para verificar o comportamento nos diferentes grupos de Babbitt, chegou-se à conclusão que os revestimentos de menor espessura continham um desempenho semelhante, enquanto para camadas mais espessas, as ligas de estanho apresentavam melhores resultados. Para corrigir a resistência à corrosão foram adicionados dois metais, o estanho e o antimónio e para conferir maior dureza foi adicionado o cobre (DeHart, A. O. 1983). Estas ligas são materiais muito macios com alguma resistência à fadiga e são indicados para cargas moderadas e/ou baixas rotações (Tecém 2013).

## **2.3. Ligas de Metal Babbitt**

As ligas de metal Babbitt já foram mencionadas anteriormente, contudo, como o trabalho experimental se foca neste tipo de ligas, será feita uma caracterização mais detalhada de modo a auxiliar a compreensão da liga investigada.

Metal Babbitt, Metal Branco, Metal Patente ou simplesmente Babbitt é o nome que designa uma liga macia, não ferrosa, utilizada em revestimentos de chumaceiras. É conhecida por conter um coeficiente de atrito baixo, e uma microestrutura composta de pequenas partículas intermetálicas relativamente rígidas embebidos numa matriz de liga macia. Foi criada em 1839 por Isaac Babbitt, nascido em 26 de julho de 1799 em Taunton, Massachusett. A sua fórmula original era constituída por 89,3% de estanho, 7,1% de antimónio e 3,6% de cobre (Tecém 2013). O baixo coeficiente de fricção do próprio material metal Babbitt permite, mesmo sem lubrificação, que as chumaceiras tenham um coeficiente de atrito reduzido. No entanto, quando adicionada uma lubrificação pode ainda atingir coeficientes de atrito surpreendentemente baixos. Além disso, o baixo custo, a boa capacidade de manuseamento e a facilidade de circulação do lubrificante entre as partículas intermetálicas, leva que a maioria dos técnicos opte por este tipo de revestimento.

### **2.3.1. A história do metal Babbitt**

Por volta do ano de 1824 em Taunton, Massachusetts, Isaac Babbitt começou a fazer experiências com várias ligas, tornando-se o primeiro produtor de utensílios feitos de Britannia (Britannia de metal é uma liga composta aproximadamente de 93% de estanho, 5% de antimónio e 2% cobre, usado para fazer vários utensílios, incluindo bules, jarras, copos e castiçais). Em 1930 começou o seu comércio, o qual durou pouco tempo devido à falta de resultados financeiros. Deste modo, Babbitt é obrigado a entregar o controlo da empresa a dois homens, Charles E. Barton e Henry Good Reed, que ressuscitaram o negócio colocando novas ideias em prática. Depois de perder o negócio, Babbitt começou a trabalhar numa fundição, deixando a sua marca no mundo industrial. Produziu em 1839 uma liga que viria a reduzir o atrito nos motores a vapor e que mais tarde se tornaria conhecida de metal Babbitt (Behr Iron & Metal s.d.).

A liga inicialmente era constituída por:

- ✓ 4 Peças de cobre
- ✓ 8 Peças de antimónio
- ✓ 24 Peças de estanho

Devido a esta inovação, Babbitt foi recompensado pelo Congresso dos EUA, onde recebeu 20000 dólares para produzir a liga com o objetivo de a aplicar na indústria naval. Desde essa data Babbitt cresceu, abrangendo uma larga gama de ligas com características semelhantes de antifricção (Behr Iron & Metal s.d.).

### 2.3.2. Normalização das ligas

As ligas de metal Babbitt estão referenciadas de acordo com algumas normas, como por exemplo:

- ✓ ASTM B-23 (American Society of Testing Materials)
- ✓ QQ-T-390A (Especificações do Governo dos EUA)
- ✓ SAE J460 (Society of Automotive Engineers)
- ✓ DIN ISO 4381 (Deutsches Institut für Normung and International Organization for Standardization)

A título de exemplo, pode verificar-se na Tabela 2.4 e Tabela 2.5 que existem oito graus de ligas normalizadas pela ASTM,

Tabela 2.4 - Composição química em peso das ligas à base de estanho, especificadas na norma ASTM B-23 (Tecém 2013).

Composição Química %	Metais Patentes à base de Estanho (Grau)			
	1	2	3	11
Estanho	90.0-92.0	88.0-90.0	83.0-85.0	86.0-89.0
Antimónio	4.0-5.0	7.0-8.0	7.5-8.5	6.0-7.5
Chumbo	0.35	0.35	0.35	0.50
Cobre	4.0-5.0	3.0-4.0	7.5-8.5	5.0-6.5
Ferro	0.08	0.08	0.08	0.08
Arsénico	0.10	0.10	0.10	0.10
Bismuto	0.08	0.08	0.08	0.08
Zinco	0.005	0.005	0.005	0.005
Alumínio	0.005	0.005	0.005	0.005
Cádmio	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabela 2.5 - Composição química em peso das ligas à base de chumbo, especificadas na norma ASTM B-23 (Tecém 2013).

Composição Química %	Metais Patentes à base de Chumbo (Grau)			
	7	8	13	15
Chumbo	Restante	Restante	Restante	Restante
Antimónio	14.0-16.0	14.0-16.0	9.5-10.5	14.5-17.5
Estanho	9.3-10.7	4.5-5.5	5.5-6.5	0.8-1.2
Cobre	0.50	0.50	0.50	0.6
Ferro	0.10	0.10	0.10	0.10
Arsénico	0.30-0.60	0.30-0.60	0.25	0.8-1.4
Bismuto	0.10	0.10	0.10	0.10
Zinco	0.005	0.005	0.005	0.005
Alumínio	0.005	0.005	0.005	0.005
Cádmio	0.05	0.05	0.05	0.05

Estas dividem-se em dois grupos de acordo com o componente maioritário, chumbo ou estanho (Tecém 2013). Apesar de existirem mais graus que identificam as ligas de metal Babbitt, a norma ASTM B-23 apenas considera os graus apresentados nas referidas tabelas.

A Tabela 2.4 apresenta as ligas à base de estanho (Tin-Based) classificadas com os graus 1, 2, 3 e 11, caracterizadas pela elevada percentagem de estanho, enquanto na Tabela 2.5 estão representadas as ligas à base de chumbo (Lead-Based) com os graus 7, 8, 13 e 15, onde o chumbo é o elemento maioritário.

As referidas tabelas (Tabela 2.4 e Tabela 2.5) mostram ainda que, cada liga consiste numa composição química ligeiramente diferente que permite abranger uma ampla gama de propriedades. As ligas designadas de acordo com a norma ASTM B-23 podem ser encontradas comercialmente com outras designações, i.e. de acordo com o fabricante. No entanto, como referido anteriormente, além destas, ainda existem outras ligas com a composição química ligeiramente diferente, como por exemplo a liga de Babbitt Tego V738 da norma DIN (81% de Sn, 12% Sb, 5.5% Cu, 1.2% Cd e 0.3% Ni).

### 2.3.3. Produção e reciclagem do metal Babbitt

No mercado internacional existem várias empresas a comercializar ligas de metal Babbitt, com produtos capazes de satisfazer uma enorme variedade de exigências, de acordo com as necessidades de cada utilizador. O processo de fabricação passa pela fundição e posterior conformação em lingotes, barras extrudadas e fios na forma de arame (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Metal Babbitt na forma de arame (a) e (b) lingotes. Adaptada: (All-biz 2010-2014).

A reciclagem do metal Babbitt pode ser efetuada com algumas restrições, nomeadamente para aplicações com elevadas exigências onde a reciclagem de liga Babbitt envelhecida não é aconselhada, devido à existência de impurezas que podem influenciar as principais características do revestimento, levar à deturpação do grau da liga, diminuir a capacidade de adesão e promover com maior facilidade a falha do equipamento.



#### 2.3.4. Preparação das superfícies do substrato para revestimentos por fundição

O sucesso destas técnicas de deposição só será alcançado se as condições de adesão se proporcionarem, obrigando a uma preparação do substrato de modo a depositar o revestimento com eficácia.

Uma das técnicas de preparação do substrato inclui a imersão prévia num banho de estanho puro a 315°C, de forma a apresentar uma camada fina “prateada” facilitando a adesão da liga de Babbitt à base de estanho.

Para situações onde não se possa efetuar a imersão do substrato, efetua-se um aquecimento e posterior derretimento de barra de estanho de modo a garantir uma camada superficial fina (Behr Iron & Metal s.d.).

Vassilaros (Vassilaros 1976) menciona que para se poder atingir uma forte ligação entre um substrato de aço e o metal Babbitt Tin-Based deve-se proceder às seguintes etapas:

- ✓ Remover oxidação (ferrugem) da superfície do substrato através de jato de areia;
- ✓ Desengordurar com acetona a superfície do substrato em aço;
- ✓ Aplicar no substrato de aço uma solução de ZnCl;
- ✓ Manter o substrato num banho de estanho, durante 1 minuto a 315 ° C.

Em situações onde não se consiga imergir o substrato, como as chumaceiras de grande porte, utiliza-se os seguintes passos:

- ✓ Remover oxidação (ferrugem) da superfície do substrato através de jato de areia;
- ✓ Desengordurar com acetona a superfície do substrato em aço;
- ✓ Aquecer o substrato de aço com um maçarico, enquanto se aplica uma solução ZnCl e se derrete uma barra de estanho.

A estanhagem por imersão e a limpeza para remover os óxidos e as gorduras são processos fundamentais para garantir a adesão entre o revestimento e o substrato, pois permitem obter adesões com tensões de rotura perto dos 93MPa, rompendo por vezes o metal Babbitt em vez da ligação com o substrato. Nos casos em que o substrato é aquecido com um maçarico e o estanho é derretido sobre ele, a ocorrência de óxidos é frequente, diminuindo significativamente a sua tensão de rotura (Vassilaros 1976).

#### 2.3.5. Dez passos para efetuar o revestimento por fundição

Em seguida descreve-se as etapas que devem ser cumpridas de modo a obter um revestimento que garanta uma qualidade aceitável, nomeadamente, no que diz respeito à adesão substrato/revestimento (Chris, et al. s.d.).

- ✓ **1º Remover se necessário o Babbitt antigo** - Nas chumaceiras usadas que necessitem de novo revestimento será importante remover o material velho, derretendo-o com um maçarico de oxiacetileno. De seguida, retira-se com um

raspador, o restante Babbitt que ainda permanece na base do substrato, juntando-o num recipiente para reciclar;

- ✓ **2º Obter o Babbitt** - O Babbitt anteriormente retirado não deve ser usado novamente, pois este contém impurezas provocadas pelos anos de uso. O método mais eficaz é a utilização de lingotes comercializados pois disponibilizam o grau de liga necessária, conforme as cargas e velocidades requeridas;
- ✓ **3º Preparação das superfícies** - As superfícies do revestimento (substrato) devem estar completamente limpas e isentas de solventes. Limpeza com reagentes químicos e granalhagem são métodos utilizados para esse fim;
- ✓ **4º Isolar o eixo** - Quando a deposição do revestimento envolve a existência do eixo no seu interior, este deve ser isolado de modo que o metal não adira nas suas faces;
- ✓ **5º Posicionar as peças** - Deve colocar-se o casquilho (chumaceira) na posição horizontal e o veio ou um molde no seu interior. Todos os furos devem ser tapados, com argila ou madeira, de modo a serem removidos posteriormente;
- ✓ **6º Derreter o metal Babbitt** - O Babbitt deve estar dentro de um recipiente em ferro fundido e aquecido até à temperatura de fusão. De seguida, após ter atingido a temperatura desejada, é vazado sobre o metal base;
- ✓ **7º Aquecer o casquilho (chumaceira)** - O aquecimento do casquilho é um processo que tem muita influência na adesão do metal Babbitt. Antes da deposição, deve aquecer-se a uma temperatura na ordem dos 121°C para evitar choques térmicos e evaporar humidade;
- ✓ **8º Limpar o metal Babbitt** - Na fase em que o metal Babbitt está totalmente aquecido, prestes a ser derramado sobre o casquilho, deve-se agitar e retirar toda escória que flutue por cima;
- ✓ **9º Verter o Babbitt** - Para garantir uma boa adesão, o metal Babbitt deve ser depositado o mais rapidamente possível. Caso o recipiente não contenha capacidade suficiente para levar a quantidade de líquido desejada, deve ser substituído com a máxima rapidez;
- ✓ **10º Terminar** - Retirar os cunhos de argila ou de madeira e avivar os furos de lubrificação. Limpar o excesso de material e, se necessário, maquinar a superfície revestida.

### 2.3.6. Técnicas de deposição do revestimento

Os processos de deposição do metal Babbitt podem ser efetuados de diversas formas, sendo selecionadas de acordo com as exigências e a qualidade do revestimento. A deposição por fundição estática, fundição centrífuga, aspersão térmica e eletrodeposição são métodos utilizados na produção do revestimento.

#### 2.3.6.1. Deposição por fundição estática ou por gravidade

A fundição estática consiste em vaziar manualmente o metal Babbitt sobre o substrato, sem que este esteja animado de qualquer movimento. Em situações em que o metal tende a

escapar, perdendo-se pelas laterais, deve colocar-se uma barreira através de um molde para não permitir o seu derramamento. O tempo de permanência do substrato no tanque de estanhagem (nas ligas Tin-Based, quando estas são imergidas no estanho puro para criar uma camada uniforme de estanho) deve ser suficiente para que aqueça, pois só assim se consegue garantir uma ligação forte. Durante o vazamento, este deve ser distribuído uniformemente por toda superfície, de modo a garantir a homogeneidade na distribuição da liga (Behr Iron & Metal s.d.).

Na Figura 2.8 pode observar-se o metal a ser vazado sobre as chumaceiras em meia-lua, onde um veio está colocado ao centro para garantir a formação de um revestimento com o diâmetro pretendido.



Figura 2.8 - Deposição de material por gravidade (Gingery 2001).

#### 2.3.6.2. Deposição por fundição centrífuga

A centrifugação do metal Babbitt é baseada na deposição do revestimento de modo uniforme sobre as superfícies do substrato, recorrendo a uma força centrífuga. Comparado com a deposição estática, consegue superar a resistência à adesão e a consistência entre o revestimento e o metal base.

Neste processo, o componente a revestir (chumaceira) deve estar alinhado e centrado de modo a garantir que o metal depositado fique com uma camada simétrica e homogênea. No final da deposição, deve arrefecer-se o exterior do componente com água, permitindo assim que o Babbitt solidifique antes do movimento de rotação parar.

Em chumaceiras de grandes dimensões, deve reduzir-se a rotação do equipamento para evitar velocidades periféricas muito grandes (Behr Iron & Metal s.d.), de forma a evitar que os elementos químicos de maior densidade sejam projetados. A Figura 2.9 ilustra o método de fixação de um componente (chumaceira) com o respetivo movimento de rotação.

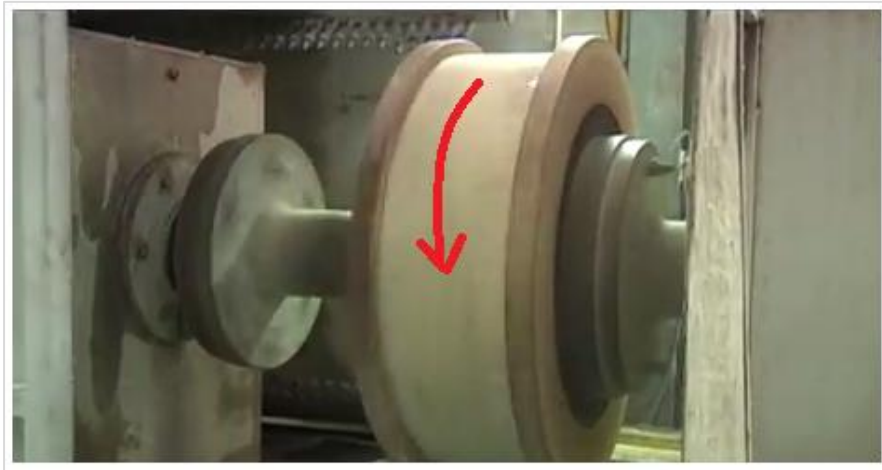


Figura 2.9 - Dispositivo de suporte com rotação (DSE Bearing Co.,Ltd 2011).

No que diz respeito à alimentação do material ao interior do componente a revestir, a Figura 2.10 exemplifica o processo.



Figura 2.10 - Alimentação do metal base na fundição centrífuga (DSE Bearing Co.,Ltd 2011).

O material é derretido e colocado no funil, que o encaminha para o interior do componente (chumaceira). Devido à rotação, a força centrífuga proporciona a adesão do revestimento à superfície interior da chumaceira (DSE Bearing Co.,Ltd 2011).

#### **2.3.6.3. Deposição por aspersão térmica**

A aspersão térmica, designada também por metalização, é um processo onde um material metálico, cerâmico ou polímero, no estado fundido ou semi fundido, é depositado sobre uma superfície (Figura 2.11).

As ligas utilizadas são processadas em pó ou na forma de arame, dividindo-se em duas formas designadas a frio ou a quente (Eutectic Castolin 2011).



Figura 2.11 - Princípio da técnica de revestimento por aspersão térmica. (Eutectic Castolin 2011).

Para processos de aplicação que necessitem de baixas temperaturas (no máximo 250 °C), utilizam-se pós e arames a frio (Chama pó e Arc Spray) e para casos em que as temperaturas necessárias oscilem entre 860 e 1100 °C, são utilizados somente pós (Chama pó e PTA “plasma de arco transferido”), conforme se pode observar no Figura 2.12 (Eutectic Castolin 2011).



Figura 2.12 - Ligas utilizadas e variantes da aspersão térmica. (Eutectic Castolin 2011).

A Tabela 2.2 apresentada anteriormente, faz referência a alguns tipos de revestimentos que podem ser obtidos por este método, apresentando também os respectivos valores que são viáveis produzir, como por exemplo o revestimento de carboneto de tungstênio que envolve o método inovador de aspersão térmica, designado por HVOF.

#### 2.3.6.3.1. HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)

O processo HVOF é designado por alta velocidade de oxigênio e combustível. É utilizado para reparar ou melhorar o acabamento superficial em componentes, por meio de pulverização de materiais derretidos ou semiderretidos, através de um fluxo de gás a alta velocidade e

temperatura. Como nos processo térmicos de pulverização, o material depois de aquecido é acelerado por um fluxo de gás que se deposita na superfície do componente. O fluxo de gás é composto pela mistura e ignição do oxigénio e combustível numa camara de combustão, de modo que o gás acelere através do bico a alta pressão e se deposite na superfície (Sulzer s.d.).

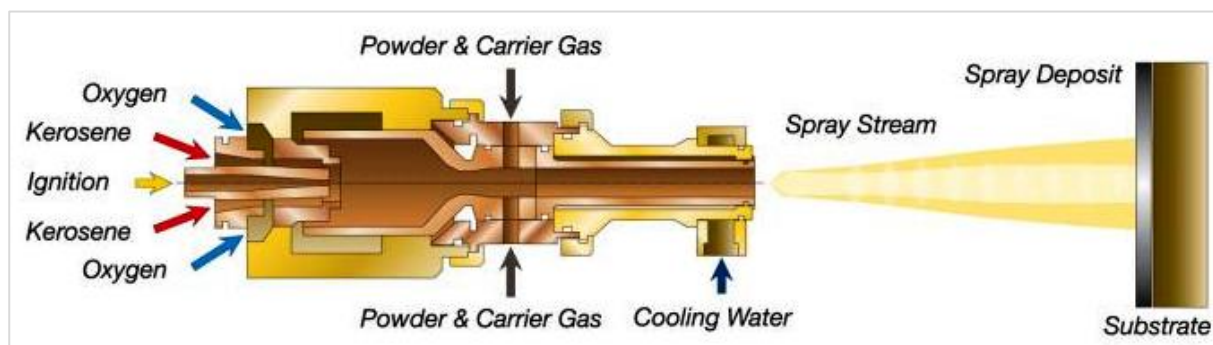


Figura 2.13 - Princípio de funcionamento do Processo HVOF. (Sulzer s.d.).

Este método é normalmente usado em revestimentos onde é exigida elevada qualidade, ou seja, em que o encarecimento do processo é compensado pela sua fiabilidade. É um processo que na maioria dos casos se efetua manualmente pelo operador. A proteção contra a corrosão, e a recuperação de eixos e chumaceiras são exemplos onde é frequente aplicar esta técnica. A superfície revestida fica porosa permitindo que o lubrificante seja absorvido para o seu interior, aumentando assim o desempenho da chumaceira.

#### 2.3.6.3.2. Pulverização do metal Babbitt

Quando se pretende revestir chumaceiras no diâmetro exterior, o método de deposição por pulverização (metalização) é o mais eficaz, uma vez que garante a qualidade na superfície revestida, devido à facilidade de controlar o processo. A pulverização por arco ou por chama são os métodos utilizados para esse fim, tendo em comum a alimentação por fio através de uma pistola que o derrete e pulveriza. Na pulverização por arco, dois fios de metal Babbitt atravessam a pistola, que através de uma descarga elétrica os funde e empurra sobre as superfícies do substrato, devido à pressão do ar comprimido. O mesmo acontece na pulverização por chama, onde o fio é alimentado para dentro da pistola aquecida por uma chama de gás, e empurrado pelo ar comprimido obrigando o metal fundido a aderir na parede do substrato.

Os pulverizadores por arco normalmente são mais eficientes que os de chama, contudo, por razões de dificuldade de portabilidade, os de chama são mais solicitados. O grande problema neste processo de deposição é o perigo que ele representa para a saúde pública, devido à grande intensidade de fumo criado pelo metal atomizado e o óxido de estanho (Behr Iron & Metal s.d.).



#### 2.3.6.4. Deposição por eletrodeposição

A eletrodeposição é uma técnica de revestimento, através da qual um metal condutor com o auxílio de corrente elétrica efetua uma emigração de partículas carregadas eletricamente numa solução iônica aquosa. A transferência envolve um processo catódico em que a peça recebe elétrons, e um processo anódico em que oxida devido à remoção dos elétrons (Figura 2.14).

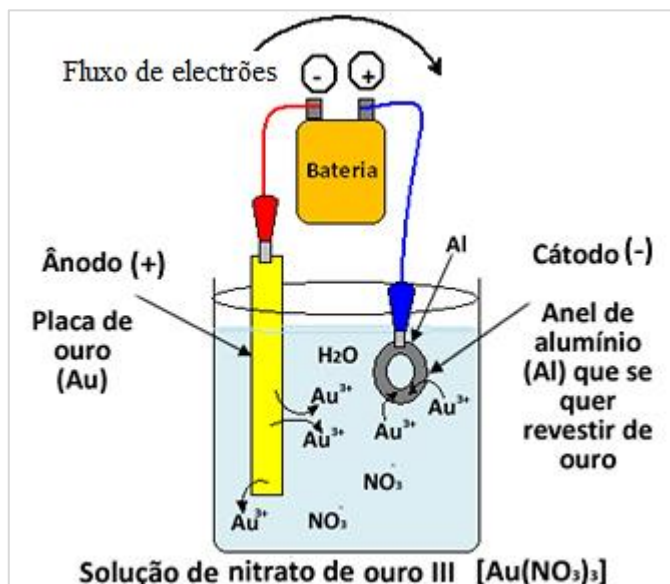


Figura 2.14 - Exemplo de eletrodeposição com um ânodo de ouro e um cátodo de alumínio.

Adaptada: (Alunos online 2011).

A eletrodeposição de metais é um processo proveniente de uma célula eletrolítica, contendo uma solução de sais iônicos do metal a depositar, que podem ser banhos de estanho, cobre, zinco, etc. Como se pode verificar na Figura 2.14 que exemplifica o revestimento de um anel de alumínio com ouro, existe uma semirreação no ânodo ( $\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$ ) que provoca uma oxidação do ouro metálico (Au), enquanto no cátodo existe uma redução, que origina a deposição de ouro no anel devido à semirreação ( $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$ ) (Alunos online 2011).

##### 2.3.6.4.1. Eletrodeposição do metal Babbitt

Quando se exige camadas de revestimento com espessuras inferiores a 0,05mm, a eletrodeposição é o método mais apropriado para o fazer. O controlo de corrente permite depositar o metal continuamente, sobre o substrato, com tolerâncias dimensionais elevadíssimas. Composições binárias de chumbo-estanho e ternárias de chumbo-estanho-cobre são depositadas através de eletrólitos de fluoborato (fluoborate electrolytes). Para garantir uma adesão perfeita, deve preparar-se o substrato com tratamentos de limpeza e processos de decapagem. Quando o metal Babbitt é depositado sobre uma liga à base de cobre ou bronze, deve criar-se uma camada fina de metal, como por exemplo de níquel, para evitar a difusão do estanho (George e Glacier 1992).

### 2.3.7. Caracterização das ligas

#### 2.3.7.1. Microestrutura

O metal Babbitt é uma liga polifásica que pode ser classificada de acordo com os tipos de microestruturas básicas. As ligas de Babbitt à base de estanho ou de chumbo apresentam uma matriz macia com partículas duras discretas. Devido à presença destas partículas (metálicas duras), a capacidade de conformação e compactação é inferior à do estanho/chumbo puro. Porém, em contrapartida, a sua resistência mecânica é significativamente superior.

A Figura 2.15-a ilustra a microestrutura do metal Babbitt (Tin-Based ou Lead-Based), com as partículas duras discretas dispersas numa matriz macia que se liga a um substrato de aço. Já a Figura 2.15-b mostra uma fotomicrografia do um Babbitt à base de chumbo (Lead-Based), as regiões escuras dizem respeito ao chumbo e as claras ao antimônio (George e Glacier 1992).

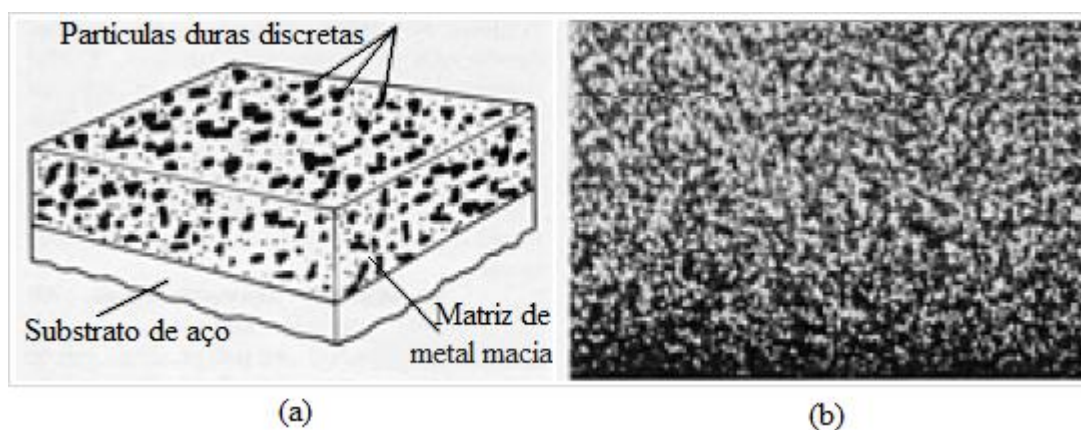


Figura 2.15 - Microestrutura do Babbitt. Alterada: (George e Glacier 1992).

#### 2.3.7.2. Propriedades

Apesar de todas as ligas conterem composições químicas diferentes, cada uma delas possui uma mistura heterogênea com partículas semelhantes rígidas integradas na matriz macia, que exibe as características da liga original. Esta estrutura permite às partículas, quando se formam, incorporarem-se uniformemente dentro da base de chumbo ou de estanho, de modo que, o Babbitt ao desgastar contenha capacidade de manter a carga e proporcione uma superfície suave que ajude a preservar o filme de óleo. Quando ocorre a decomposição do óleo lubrificante, o revestimento de Babbitt tem características autolubrificantes que permitem um desgaste controlado (Behr Iron & Metal s.d.).

As ligas de Babbitt devem possuir propriedades que permitam a eficácia do movimento relativo entre as superfícies. A resistência mecânica deve permitir suportar esforços de compressão e/ou de fadiga, sem negligenciar a temperatura de funcionamento pois as propriedades mecânicas diminuem com o seu aumento (Figura 2.16).

Na Figura 2.16 pode-se ver uma queda acentuada da resistência à compressão à medida que a temperatura sobe para valores da ordem dos 100 a 200 °C (DeHart, A. O. 1983).



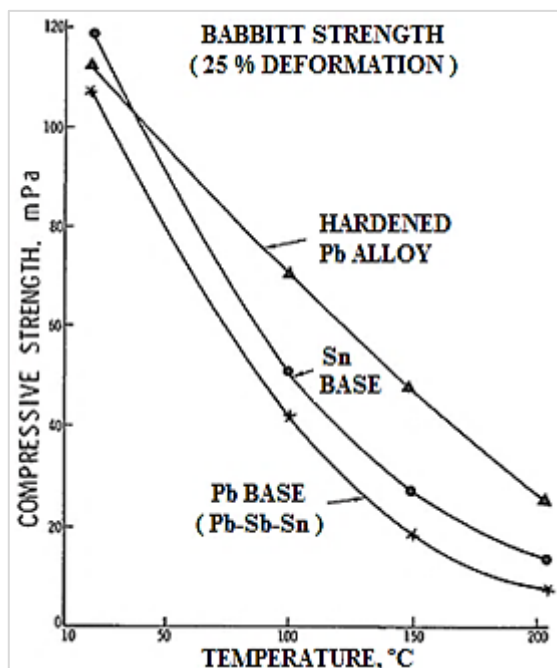


Figura 2.16 - Resistência à compressão das ligas Babbitt em função da temperatura (DeHart, A. O. 1983).

A fadiga é outro fenómeno que dificulta a performance das ligas Babbitt. As chumaceiras com esforços de caráter dinâmico estão sujeitas a este problema, baixando drasticamente o tempo de vida dos materiais em serviço. Os revestimentos de metal Babbitt com camadas mais espessas são os que menos resistem à fadiga, pois fissuram com maior facilidade, libertando pequenas partículas (DeHart, A. O. 1983).

Na Tabela 2.6 pode analisar-se o comportamento de vários materiais sujeitos à fadiga, onde as ligas de Babbitt mais espessas evidenciam os piores resultados. Contudo, as ligas de Babbitt que possuem camadas de revestimento mais finas são as que contêm melhor capacidade de carga dinâmica.

Tabela 2.6 - Valores típicos de resistência à fadiga para materiais em rotação (DeHart, A. O. 1983).

Material	Capacidade de Carga Dinâmica Máx. [Mpa]
Bronze	100
Prata	80
Cobre	80
Cobre e chumbo com estanho	70
Ligas de Alumínio	25 a 60
Cobre e chumbo	20 a 50
Babbitt Fino	10 a 25
Babbitt Grosso	5 a 10

Para camadas inferiores a 0,1mm de espessuras, as ligas de Babbitt proporcionam um aumento significativo no tempo de vida útil (Figura 2.17).

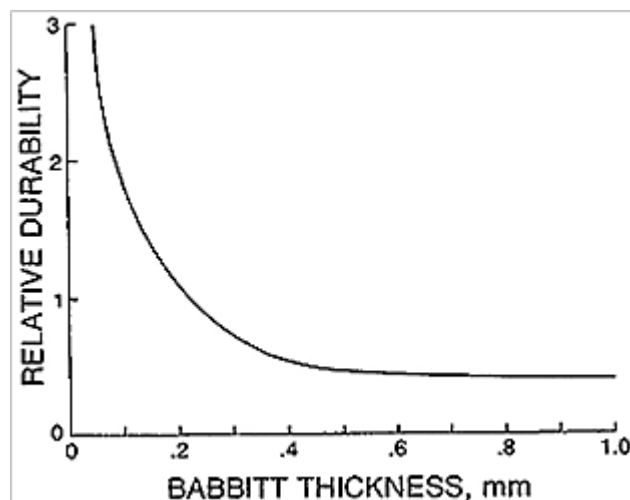


Figura 2.17 - Efeito da espessura na vida do Babbitt à fadiga (DeHart, A. O. 1983).

Em resumo, quando se seleciona uma liga de Babbitt deve ter-se em consideração as forças exercidas sobre a liga, principalmente quando sujeita a um aumento de temperatura. Quanto às camadas do revestimento, as de menor espessura são as que mais resistem à fadiga e à compressão (DeHart, A. O. 1983).

### 2.3.7.3. Comparação de propriedades: Liga grau 2 (Tin-based) e grau 7 (Lead-based)

Como referido anteriormente, as ligas à base de estanho são as que apresentam melhores propriedades, permitindo suportar velocidades e cargas que superam facilmente os limites das ligas à base de chumbo (Tabela 2.3). De modo a perceber as diferenças existentes entre os dois grupos, expõe-se uma revisão que compara as propriedades da liga grau 2 com a liga grau 7.

Como se pode observar nas Tabela 2.7, Tabela 2.8, Tabela 2.9 e Tabela 2.10 existem significativas diferenças no que diz respeito às propriedades mecânicas e térmicas.

Relativamente às propriedades mecânicas a diferentes temperaturas (Tabela 2.7 e Tabela 2.8) a liga de grau 2 apresenta sempre dureza superior à de grau 7 e maior resistência à tração (Behr Iron & Metal s.d.).

Tabela 2.7 - Propriedades mecânicas da liga de grau 2 de acordo com a temperatura de utilização (Behr Iron & Metal s.d., George e Glacier 1992).

Temperatura	Resistência à Tração	Alongamento	Redução	Dureza
°C	MPa	%	na área %	HB
20	77	18	25	24,5
100	45	23	28	12
149	28	32	38	—

Tabela 2.8 - Propriedades mecânicas da liga de grau 7 de acordo com a temperatura de utilização (Behr Iron &amp; Metal s.d.).

Temperatura	Resistência à Tração	Alongamento	Redução	Dureza
°C	MPa	%	na área %	HB
25	72	4	—	22
100	38	25	—	10,5
150	21	52	—	8

Tabela 2.9 - Propriedades mecânicas das ligas de grau 2 e 7 (Ashby M. 2011).

Liga	Propriedades Mecânicas				
Grau	Módulo de Young (GPa)	Coef. De Poisson	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de Rotura (MPa)	Dureza (HV)
2	48 a 56	0,33 a 0,35	38 a 76	70 a 90	20 a 35
7	27 a 31	0,435 a 0,445	23 a 26	65 a 80	20 a 25

Tabela 2.10 - Propriedades térmicas das ligas de grau 2 e 7 (Ashby M. 2011).

Liga	Propriedades Térmicas				
Grau	Ponto de Fusão (°C)	Temp. Máx. de Serviço (°C)	Temp. Mín. de Serviço (°C)	Condutividade térmica (W/m.°C)	Calor Específico (J/kg.°C)
2	241 a 354	-3 a 27	-273	40 a 70	215 a 235
7	240 a 268	20 a 50	-273	23 a 25	155 a 165

Independente das ligas de Babbitt à base de estanho conterem melhores propriedades, não se deve direcionar os revestimentos apenas para a sua utilização, pois nem todas as aplicações requerem estas propriedades, podendo as ligas à base de chumbo satisfazer essas necessidades.

#### 2.3.7.4. Corrosão e oxidação do metal Babbitt

A corrosão é um problema que afeta uma quantidade significativa de revestimentos metálicos, estando entre eles as ligas de Babbitt. O cobre e o chumbo são bastante vulneráveis à corrosão, principalmente quando os óleos oxidam, formando compostos orgânicos complexos de ácidos que atacam as superfícies dos revestimentos enfraquecendo a sua estrutura (DeHart, A. O. 1983).

As ligas à base de estanho são normalmente impenetráveis à corrosão derivada da oxidação de óleos, contudo, a existência de água do mar ou de gases corrosivos, corroem facilmente estas ligas (George e Glacier 1992).

Para resolver o problema de oxidação, os óleos devem ser selecionados de modo a satisfazer as necessidades exigidas da lubrificação. Uma manutenção adequada, com substituição ou

adição de óleo novo, garante o sucesso e a eficácia do revestimento contra corrosão e oxidação.

#### **2.3.7.5. Desgaste do metal Babbitt**

A ocorrência de desgaste no metal Babbitt é um fator relevante para determinar o grau da liga a utilizar no revestimento das chumaceiras. Os materiais com movimento relativo entre si, estão sujeitos a vários processos que tendem a evidenciar o seu aparecimento. O metal Babbitt não foge a essa regra, pois está sujeito a vários mecanismos de desgaste, tais como a abrasão, adesão, fadiga, corrosão ou sua combinação.

O desgaste adesivo do metal Babbitt é proveniente da soldadura das suas partículas (material mais fraco), que normalmente são arrancadas e transportadas pelo movimento do sistema. O desgaste abrasivo é um processo mais mecânico em que o material mais duro arranca as partículas do mais fraco (metal Babbitt no caso das chumaceiras, como pretendido). A corrosão também é um fator relevante para analisar no desgaste do metal Babbitt, devido ao facto da sua resistência à corrosão ser muito baixa em ambientes corrosivos. A lubrificação tem um papel fundamental para facilitar o movimento dos equipamentos, ajudando-os a proteger de diversos mecanismos que possam corroer as suas superfícies de apoio. Os ciclos dinâmicos interferem bastante no desgaste do Babbitt, devido ao aparecimento da fadiga, que faz que as suas camadas sejam fissuradas com facilidade, propagando-se ao longo da liga libertando pequenas partículas (DeHart, A. O. 1983).

#### **2.3.8. Avaliação da adesão do metal Babbitt ao substrato**

Hoje em dia existem várias técnicas capazes de avaliar a adesão do metal Babbitt. Os ensaios de tração são métodos bastante utilizados para determinar esta característica. A Microscopia eletrónica de varrimento e microscopia ótica também permitem analisar esta propriedade, pois realçam a interface dos diferentes materiais com elevada nitidez, de modo a verificar a existência de possíveis irregularidades nessa zona.

Já os ensaios por líquidos penetrantes detetam descontinuidades na superfície do material. Neste processo o líquido penetrante é aplicado sobre a superfície, onde após algumas horas é removido para colocar uma mistura de solvente com pó de giz para secar e absorver dentro das fissuras o líquido penetrante colocado anteriormente (Infosolda 2013).

Também os raios X possuem capacidade para penetrar os materiais, possibilitando através da quantidade de radiação absorvida em função da espessura, e da densidade desse ponto, avaliar a estrutura interna do material, de modo a detetar qualquer irregularidade. Outro método de análise passa pelos equipamentos ultrassónicos que possibilitam detetar defeitos de adesão ou delaminação. Este é um método de avaliação não destrutivo que se baseia na influência da qualidade de adesão sobre a amplitude dos sinais de ultrassons refletidos pela interface do metal Babbitt com o substrato. Esta técnica deteta zonas defeituosas e avalia a área afetada.

## 2.4. Fenómenos que ocorrem na adesão

Tendo em consideração que uma parte do trabalho experimental se centra no estudo da adesão do revestimento ao substrato, considera-se pertinente compreender com maior detalhe os fatores envolvidos na adesão, os quais serão posteriormente explorados. A aplicação de um revestimento sobre uma superfície deve contemplar vários requisitos para que o processo de adesão seja eficiente, tais como: (i) espalhamento uniforme de modo molhar toda a superfície, (ii) ângulo de contacto muito perto do zero e (iii) solidificação rápida para estabelecer uma sólida, coesa e forte ligação. O contacto íntimo entre as moléculas do revestimento e as da superfície do substrato ao endurecerem provocam reações químicas com movimentações atômicas que podem ser formadas pelas forças de van der Waals, ou mesmo, pelas forças intermoleculares das ligações químicas no processo de endurecimento. Este mecanismo depende do próprio revestimento e do substrato quando reagem quimicamente, pois se o revestimento penetrar no substrato com eficácia e apresentar um bom bloqueio mecânico, obtém-se uma adesão de grande resistência mecânica (Comyn 2006).

É importante salientar que para existir adesão terão de estar subjacentes os seguintes fenómenos:

- ✓ Ligação química;
- ✓ Adsorção física;
- ✓ Molhagem (ângulo de contacto);
- ✓ Bloqueio mecânico;
- ✓ Difusão atômica.

### 2.4.1. Ligação química

As ligações químicas de adesão podem ocorrer de várias maneiras, sendo elas feitas através da formação de ligações metálicas, iónicas ou covalentes, designadas de forças primárias.

- ✓ Ligações metálicas: são provenientes da partilha em comum de eletrões livres nas ligações de condução das estruturas metálicas.
- ✓ Ligações iónicas: resultam da atração electrostática de Coulomb entre partículas de cargas opostas.
- ✓ Ligações covalentes: advém da partilha de pares de eletrões entre partículas sem carga.

### 2.4.2. Adsorção física

A adsorção física depende apenas das forças envolvidas entre as superfícies do substrato e do adesivo. As moléculas ao se aproximarem interagem formando ligação entre elas designadas por forças de van der Waals. Estas são conhecidas por forças intermoleculares secundárias mais fracas envolvidas no sistema, designando mesmo assim um papel fundamental na teoria da adesão (Comyn 2006).

As forças de van der Waals são designadas de três tipos:

- ✓ Forças entre dois dipolos permanentes e induzidos;
- ✓ Forças entre um dipolo permanente;
- ✓ Forças de dispersão.

As ligações de hidrogénio contribuem também para a adesão, apresentando propriedades intermédias entre as ligações primárias e secundárias. A Tabela 2.11 compara as energias e as distâncias de ligação dos referidos mecanismos de adesão. Todas as ligações são forças efetivas com distancias muito curtas ( $< 10$  angströms). As forças de dispersão são as que conseguem atingir distâncias mais longas, mas com energias muito fracas (Silva, Magalhães e Moura 2007).

Tabela 2.11 - Energias e comprimentos de ligação (Silva, Magalhães e Moura 2007).

Tipo de ligação	Energia de ligação (kJ/mole)	Comprimento da ligação ( $\times 10^{-10}\text{m}$ )
Iónica	600 ~ 1200	2 ~ 4
Covalente	60 ~ 800	1 ~ 2
Metálica	100 ~ 350	2 ~ 6
Dipolo	~ 20	2 ~ 4
Dispersão	~ 40	4 ~ 6
Hidrogénio	~ 60	~ 3

#### 2.4.3. Ângulo de contacto / Molhagem

Quando um líquido adesivo é depositado sobre uma superfície sólida, forma uma gota que é descrita em termos científicos pelo ângulo de contacto ( $\phi$ ) entre essa superfície e a tangente à superfície do líquido no ponto de contacto (Figura 2.18).

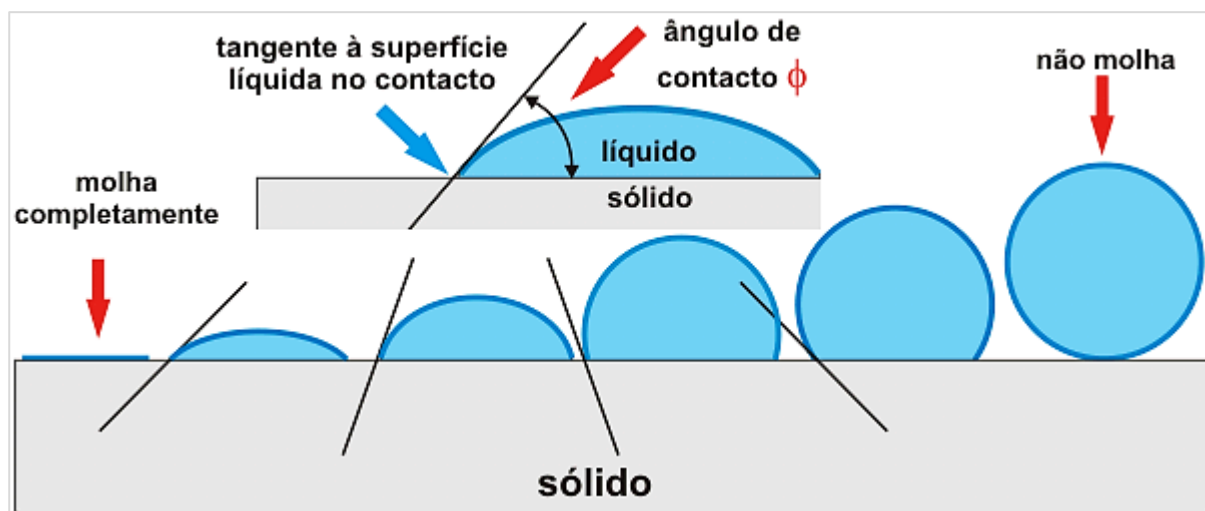


Figura 2.18 - Ângulo de contacto entre um líquido e um sólido. Alterada: (Alhanati s.d.).

A Figura 2.18 permite ainda observar que a diminuição do ângulo de contato proporciona uma melhoria na molhagem da superfície.

Uma adesão satisfatória requer que o líquido se espalhe numa fina camada monomolecular de modo a molhar completamente a superfície sólida.

#### 2.4.4. Bloqueio mecânico

O bloqueio mecânico está relacionado com o entrelaçamento do adesivo (revestimento) nas irregularidades (porosidade do metal base) da superfície a revestir. O revestimento ao penetrar nas irregularidades porosas bloqueia após endurecer. O grau de entrelaçamento depende da porosidade do material, viscosidade do adesivo fundido e da pressão exercida após vazamento.

Comyn descreve ainda que, o aumento ou diminuição da rugosidade na superfície do substrato não significa que possa existir um aumento da força de adesão (Comyn 2006).

#### 2.4.5. Difusão no estado sólido

A difusão é um processo de transporte de material por movimento atômico que ocorre nas reações de transferência de massa dentro de um sólido, a partir de um líquido, um gás ou outra fase sólida (Callister e Rethwisch 2012).

Este fenómeno de difusão está ilustrado na Figura 2.19 onde duas barras metálicas, cobre e níquel são juntas com contato íntimo entre faces.

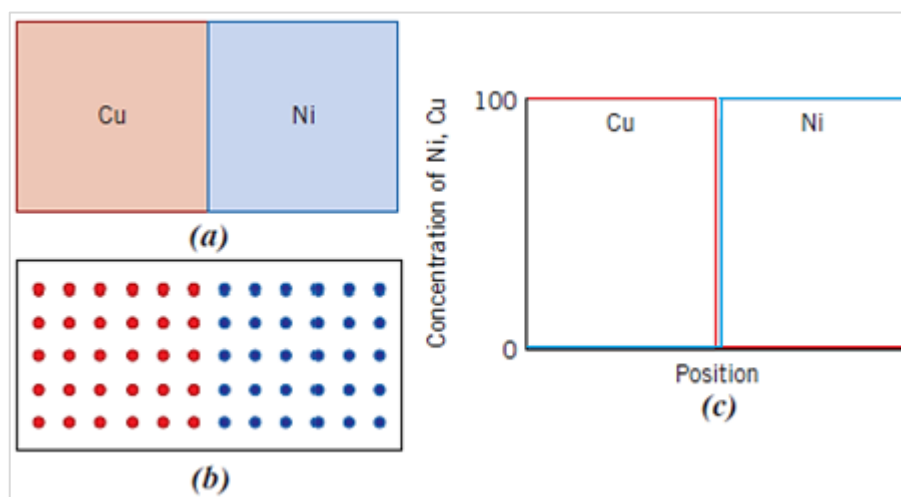


Figura 2.19 - Par de difusão cobre e níquel. (Callister e Rethwisch 2012).

De seguida, são aquecidas a altas temperaturas durante um período prolongado de tempo (mas abaixo da temperatura de fusão dos dois metais) e arrefecidas até à temperatura ambiente.

Observa-se que o cobre e o níquel puro continuam nas extremidades de cada material, enquanto no centro é formada uma região de ligação (Figura 2.20-b).

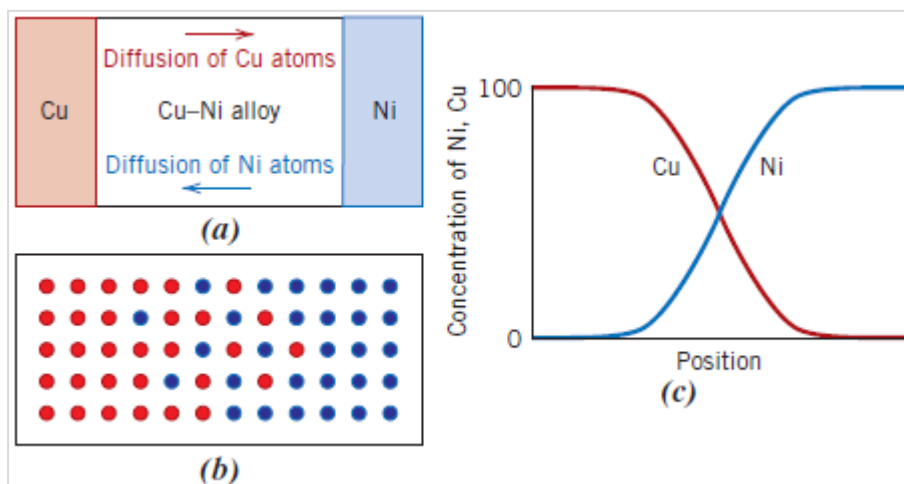


Figura 2.20 - Resultado da difusão do cobre e níquel e respectivas concentrações. (Callister e Rethwisch 2012).

As concentrações variam de acordo com a Figura 2.20-c, pois os átomos de cobre migraram ou fundiram no níquel e o níquel no cobre, variando a concentração em ambos materiais (Callister e Rethwisch 2012).

A este processo em que os átomos de um metal difundem no outro é designado por interdifusão, podendo ser avaliado a partir de uma perspectiva macroscópica por mudanças na concentração que ocorrem ao longo do tempo com transporte de átomos da maior para a mais baixa região de concentração (Callister e Rethwisch 2012).

#### 2.4.5.1. Processos termicamente ativados

Com o aumento da temperatura os vários fenómenos de difusão ocorrem a maiores velocidades. A dependência da velocidade de reação ou transformação ( $V$ ) em função da temperatura e da barreira de energia que se opõe à reação é representada pela equação 2.1, equação empírica de Arrhenius (1859-1927) (Padilha 2000).

$$V = c \exp (-Q/RT) \quad (2.1)$$

$V$  é a velocidade da reação ou transformação,  $c$  é uma constante,  $R$  a constante dos gases e  $T$  a temperatura absoluta.  $Q$  é a energia de ativação que define a altura da barreira de energia que se opõe à ocorrência da reação ou transformação e que necessita de ser vencida por excitação térmica.

A Figura 2.21-a esquematiza um processo termicamente ativado, no qual, o “estado 2” de menor energia é mais estável do que o “estado 1”. Se ocorrer passagem do estado 1 para o estado 2, a barreira energética  $Q$  é vencida. A energia de ativação deste processo pode ser determinada pelo declive da reta apresentada na Figura 2.21-b, respeitante à equação de Arrhenius (Padilha 2000).



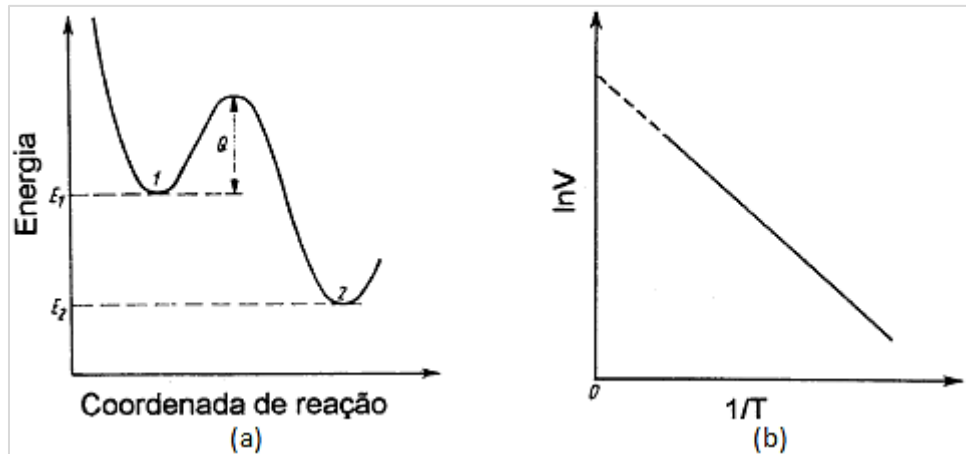


Figura 2.21 - (a) Representação do processo de difusão termicamente ativado; (b) Declive da reta descrita pela equação de Arrhenius. (Padilha 2000).

#### 2.4.5.2. Mecanismos de difusão

Os átomos nos metais sólidos estão constantemente em movimento na sua rede cristalina, mudam-se rapidamente de posição, o que quebra a ideia associada ao seu repouso. Acima de zero Kelvin (K), os átomos vibram no seu reticulado em torno das suas posições de equilíbrio, com trocas frequentes de posição entre si, designadas de autodifusão (Padilha 2000).

A autodifusão ocorre em metais puros, onde todos os átomos do mesmo tipo trocam de posição.

A Figura 2.22 ilustra o mecanismo que envolve a troca de um átomo a partir da sua posição normal na rede para ocupar um interstício. Este mecanismo acontece devido ao número de interstícios encontrados pelos defeitos existentes na rede (Callister e Rethwisch 2012).

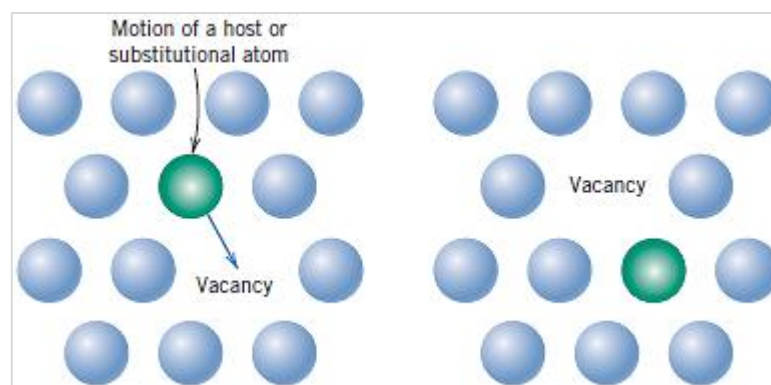


Figura 2.22 - Mecanismo de autodifusão (difusão substitucional) (Callister e Rethwisch 2012).

Para que ocorra o movimento descrito, deverão estar presentes duas condições:

- ✓ Deve existir um local adjacente vazio;
- ✓ O átomo deve ter energia suficiente para quebrar as ligações dos átomos vizinhos.

Nas soluções sólidas intersticiais a passagem do átomo intersticial entre os átomos da rede, acontece com maior probabilidade e maior rapidez, do que no caso da difusão substitucional. (Padilha 2000).

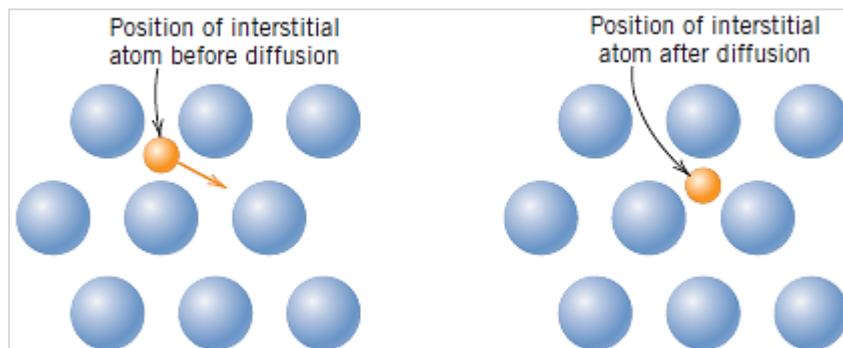


Figura 2.23 - Mecanismo de difusão intersticial. (Callister e Rethwisch 2012).

#### 2.4.5.3. Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão ( $D$ ) é expresso pela equação 2.2 onde:

$$D = D_0 \exp \frac{-Q}{RT} \quad (2.2)$$

$D_0$  é o fator pré-exponencial independente da temperatura ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $Q$  é a energia de ativação para difusão ( $\text{J/mol}$ ;  $\text{cal/mol}$  ou  $\text{eV/átomo}$ ),  $R$  é a constante dos gases ( $8,31 \text{ J/mol K}$ ;  $1,987 \text{ cal/mol}$ ; ou  $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/átomo}$ ) e  $T$  é a temperatura absoluta ( $\text{K}$ ).

A Tabela 2.12 apresenta o coeficiente de difusão de diferentes espécies químicas em materiais distintos.

Tabela 2.12 - Coeficientes de difusão em vários sistemas (Callister e Rethwisch 2012).

Diffusing Species	Host Metal	$D_0 (\text{m}^2/\text{s})$	Activation Energy $Q_d$		Calculated Values	
			$\text{kJ/mol}$	$\text{eV/atom}$	$T (^\circ\text{C})$	$D (\text{m}^2/\text{s})$
Fe	$\alpha$ -Fe (BCC)	$2.8 \times 10^{-4}$	251	2.60	500	$3.0 \times 10^{-21}$
					900	$1.8 \times 10^{-15}$
Fe	$\gamma$ -Fe (FCC)	$5.0 \times 10^{-5}$	284	2.94	900	$1.1 \times 10^{-17}$
					1100	$7.8 \times 10^{-16}$
C	$\alpha$ -Fe	$6.2 \times 10^{-7}$	80	0.83	500	$2.4 \times 10^{-12}$
					900	$1.7 \times 10^{-10}$
C	$\gamma$ -Fe	$2.3 \times 10^{-5}$	148	1.53	900	$5.9 \times 10^{-12}$
					1100	$5.3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	$7.8 \times 10^{-5}$	211	2.19	500	$4.2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	$2.4 \times 10^{-5}$	189	1.96	500	$4.0 \times 10^{-18}$
Al	Al	$2.3 \times 10^{-4}$	144	1.49	500	$4.2 \times 10^{-14}$
Cu	Al	$6.5 \times 10^{-5}$	136	1.41	500	$4.1 \times 10^{-14}$
Mg	Al	$1.2 \times 10^{-4}$	131	1.35	500	$1.9 \times 10^{-13}$
Cu	Ni	$2.7 \times 10^{-5}$	256	2.65	500	$1.3 \times 10^{-22}$

A difusão nas estruturas mais compactas como CFC e a HC é mais lenta, comparando com a estrutura CCC. Próximo do ponto de fusão vários metais com estrutura CFC ou HC apresentam um coeficiente de autodifusão na ordem de  $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  (Padilha 2000).

#### 2.4.6. Mecanismo de adesão em metais

De forma a satisfazer o mecanismo de adesão entre materiais sólidos, deve garantir-se a inexistência na superfície de elementos contaminantes como o oxigênio, água ou óleo. A própria matéria orgânica que existe na atmosfera, o aumento da rugosidade e dureza nas superfícies, são fatores que tendem dificultar a adesão. Na adesão de metais com metais, exceto em materiais nobres como o ouro ou platina, existe sempre uma película de óxido que normalmente não é detetada. Apesar de ter uma espessura manométrica impede gravemente o contato entre os metais. Para ser possível uma adesão eficiente, deve recorrer-se a equipamentos especiais, como os sistemas de alto vácuo, de forma a inibir os contaminantes das superfícies, proporcionando mudanças drásticas nos resultados obtidos (Stachowiak e Batchelor 2000).

A tendência para dois metais aderirem não abdica da solubilidade mútua entre eles ou do tamanho relativo dos seus átomos. Muitos testes realizados com vários materiais mostram que, quando existe uma grande adesão entre metais, estes têm tendência a separar-se, com transferência do metal com menor resistência mecânica (mais fraco), para o metal com maior resistência mecânica (mais forte). A Figura 2.24 ilustra essa teoria (Stachowiak e Batchelor 2000).

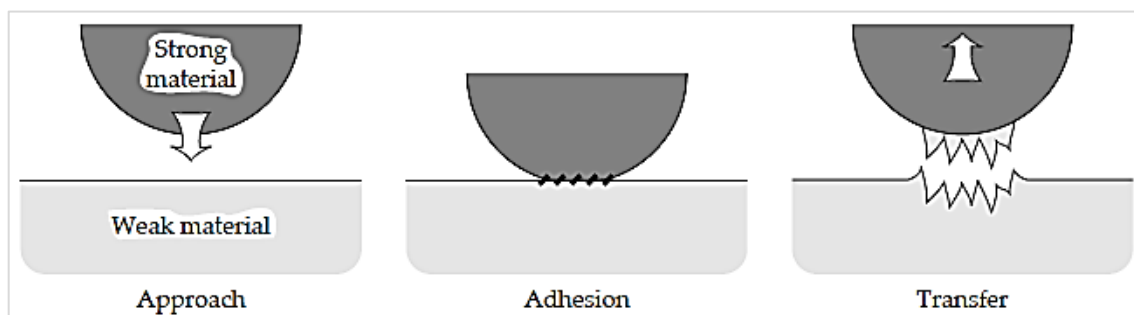


Figura 2.24 - Transferência de metal na interface de uma ligação sujeita a um esforço de separação. (Stachowiak e Batchelor 2000)

Como se sabe, nos metais, os elétrons são partilhados devido ao movimento contínuo entre os seus átomos. Este fenómeno permite que os elétrons possam ser facilmente trocados entre sólidos para estabelecer uma ligação. Ou seja, como não estão vinculados a uma estrutura rígida, e desde que a distância entre dois corpos seja suficientemente pequena ( $< 1 \text{ [nm]}$ ), podem passar de um corpo para o outro, ligando-se, mesmo que as suas estruturas atômicas sejam diferentes (normalmente entre metais diferentes o que contém densidade maior doa elétrons ao outro). As estruturas cristalinas também influenciam a adesão dos metais, verifica-

se, através de experiências realizadas, que a hexagonal compacta tem menos adesão que as outras três principais (Tetragonal, Cubica de Corpo Centrada e Cubica de Faces Centrada).

A Figura 2.25 mostra a relação existente entre o coeficiente de adesão e a dureza de vários metais puros, para cada uma das quatro redes cristalinas analisadas (Tetragonal, Cubica de Corpo Centrada e Cubica de Faces Centrada e Hexagonal Compacta). Verifica-se que os materiais com dureza semelhante, mas com estrutura cristalina diferente, têm diferenças significativas na adesão. Por exemplo, a comparação do alumínio com o zinco ou a comparação do chumbo com o estanho confirma a afirmação apresentada (Stachowiak e Batchelor 2000).

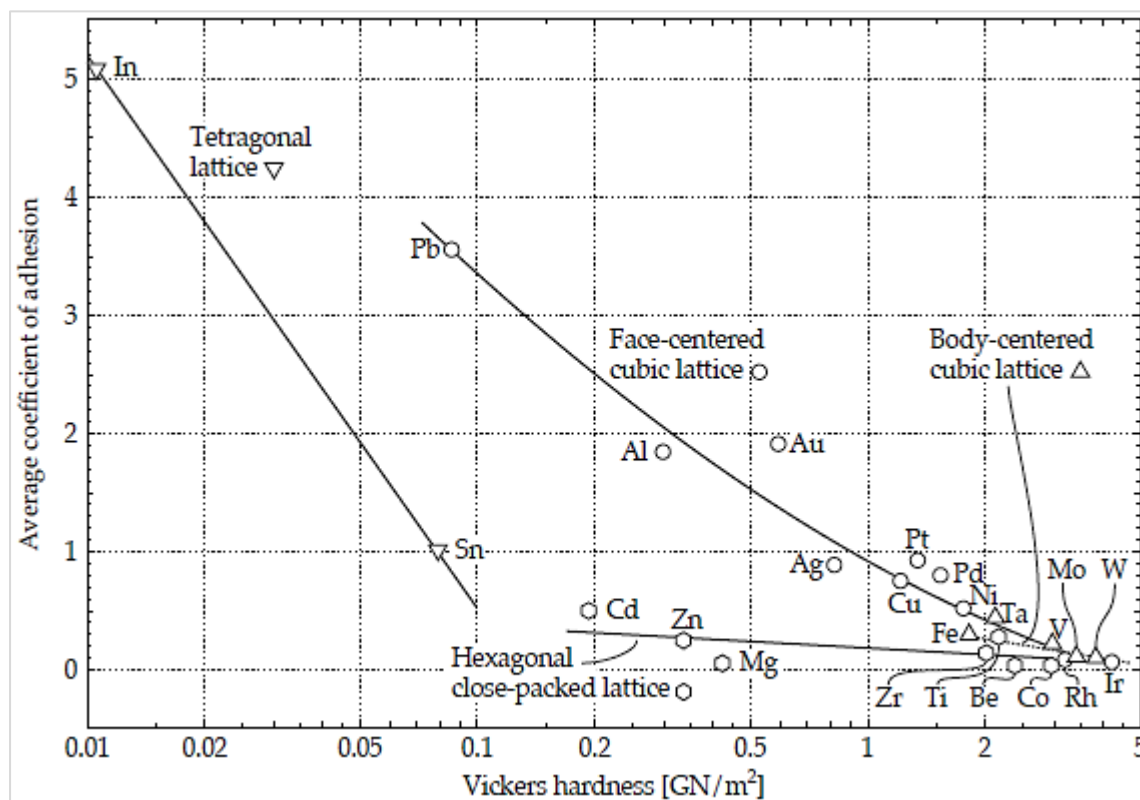


Figura 2.25 - Coeficiente de adesão versus dureza. (Stachowiak e Batchelor 2000).

Existem outros fatores que influenciam a adesão. É sabido que a dureza elevada, grande energia superficial ou o módulo de elasticidade, dificultam a adesão. A reatividade química ou a eletronegatividade dos metais são outras características que também influenciam a adesão dos metais (Stachowiak e Batchelor 2000).

#### 2.4.6.1. Limpeza e reatividade química

Além do aumento da porosidade, os processos mecânicos, eletroquímicos ou químicos, são também essenciais para remover óxidos ou impurezas depositadas sobre as superfícies metálicas (substratos de aço). A reatividade superficial do substrato é outro fator determinante no mecanismo de adesão. Existem vários processos capazes de tornar as superfícies reativas, o ataque químico por plasma, radiação ultravioleta, ozono aquoso e soluções ácidas ou básicas

são várias técnicas que possibilitam obter esse fim. Contudo, tanto a radiação ultravioleta como o ozono aquoso são processos de difícil acesso, o que dificulta a sua utilização (Prodócimo 2008).

O ataque químico por plasma e as soluções ácidas permitem obter excelentes resultados no mecanismo de adesão, no entanto, o plasma torna o processo bastante dispendioso (o plasma apresenta maior adesão devido ao aumento da porosidade superficial), levando que os tratamentos superficiais sejam direcionados para as soluções ácidas ou básicas. As soluções ácidas e básicas reagem facilmente com os hidróxidos depositados nas superfícies metálicas (os óxidos das superfícies metálicas são normalmente hidróxidos), especialmente nos aços que tendem formar óxidos à temperatura ambiente (Prodócimo 2008).

Existem várias soluções que permitem limpar e reativar as superfícies metálicas, como e.g.: ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido fosfórico e ácido nítrico (SciELO 2002). No entanto, para substratos em aço existe uma solução composta por ácido sulfúrico com peróxido de hidrogénio que permite obter excelentes resultados nos tratamentos superficiais (Prodócimo 2008).

#### **2.4.6.1.1. Solução piranha**

A solução piranha consiste numa mistura fortemente oxidante de ácido sulfúrico com peróxido de hidrogénio ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ). Esta mistura permite remover materiais orgânicos, e modificar as superfícies pela adição/libertação do grupo funcional hidroxilo (grupos OH), tornando-as extremamente hidrófilas (Wikipedia 2014).

É uma solução altamente oxidante e corrosiva composta normalmente por uma mistura típica 3:1 onde a concentração contém 30% de peróxido de hidrogénio. Concentrações de 4:1 e 7:1 também se encontram com frequência. A preparação da solução piranha deve ser feita pela adição do peróxido de hidrogénio no ácido sulfúrico muito lentamente, pois a mistura promove uma reação exotérmica que pode provocar temperaturas na ordem dos 100°C. Para tratamento de superfícies contaminadas deve ser colocada lentamente, pois superfícies que contenham excesso de contaminantes efervescem, provocando uma explosão devido à libertação de gás (Wikipedia 2014).

A eficácia da solução piranha deve-se ao facto do ácido sulfúrico concentrado ser termodinamicamente muito favorável, contendo uma  $\Delta H$  de -880 k J/mol que permite remover o hidrogénio e o oxigénio como unidade de água pelo ácido sulfúrico concentrado. Outro facto deve-se ao ácido sulfúrico concentrado converter o peróxido de hidrogénio num agente oxidante agressivo que promove a dissolução do carbono elementar. A desidratação energética do peróxido de hidrogénio torna-se favorável para formar iões de hidrónio ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), iões de bissulfato ( $\text{HSO}_4^-$ ) e oxigénio atómico (Wikipedia 2014).

A solução piranha contém um elevado grau de acidez que permite limpar as superfícies pela dissolução dos óxidos metálicos e dos carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ ). Promove a energia livre superficial e o aumento de porosidade (Prodócimo 2008).



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De modo a compreender o mecanismo de adesão entre o revestimento de metal Babbitt e o substrato de aço, houve necessidade de se caracterizar um composto bimetálico através de várias técnicas de análise que permitissem identificar as suas propriedades. Neste capítulo serão expostos os ensaios experimentais, referindo os equipamentos e as técnicas utilizadas.

#### 3.1. Composto bimetálico Aço/Babbitt

O composto bimetálico foi concebido a partir da junção de um revestimento pertencente a uma liga metálica de Babbitt, com um metal base designado por Aço St52 (aço não ligado com 0,2 % de carbono) (Figura 3.1). O processo de interligação entre ambos foi efetuado pela deposição gravítica, conhecida também por vazamento estático, onde o Babbitt líquido é vazado sobre a superfície de aço.



Figura 3.1 - Material fornecido pela empresa Cruz & Cruz para caracterização.

Para realização dos diferentes ensaios nos equipamentos selecionados, houve necessidade de se cortar o composto bimetálico em pequenas amostras/provetes, de forma a facilitar os ensaios.

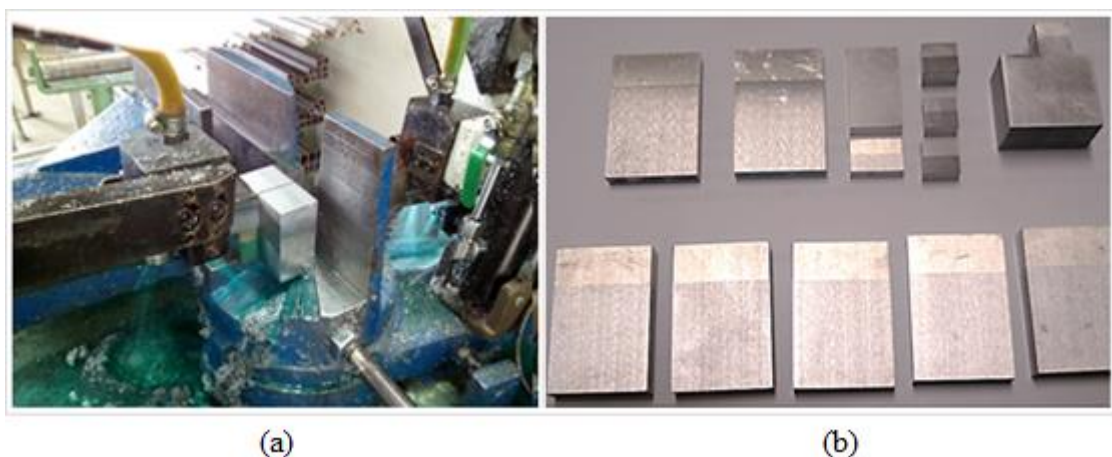


Figura 3.2 - (a) Corte das amostras no serrote mecânico (b) Amostras/provetes para ensaios.



### 3.2. Preparação das amostras/provetes

É lógico que todo o processo de preparação das amostras/provetes envolveu uma diversidade de tarefas que necessitaram de produtos e equipamentos específicos para a sua realização.

A Figura 3.3-a ilustra a máquina onde as amostras e os provetes foram fresados, ficando nas diversas geometrias conforme representado na Figura 3.2-b. Para obter melhor acabamento superficial, de modo a facilitar o polimento das amostras, estas foram retificadas numa retificadora plana com um rebolo em óxido de alumínio (Figura 3.3-b). Do mesmo modo, retificaram-se os provetes, onde ficaram com acabamento de baixa rugosidade e dimensões iguais (Figura 3.2-b).



Figura 3.3 - (a) Fresadora e (b) retificadora plana.

Quanto à preparação do substrato em aço e à maquinação do composto bimetálico (Figura 3.1), o equipamento utilizado para esse fim foi uma fresadora existente na empresa que forneceu o respetivo material.

Por forma a dar início aos ensaios microscópicos, as amostras (peças mais pequenas da Figura 3.2-b) foram embutidas numa resina epóxi epomet. Na Figura 3.4-a pode ver-se as resinas usadas para embutir as amostras (Figura 3.6-b) e na Figura 3.4-b o equipamento de compactação e solidificação das mesmas.



Figura 3.4 - (a) Resina epóxi epomet e (b) máquina de compactação.



Já na Figura 3.5 visualiza-se as técnicas existentes no laboratório do DEM no ISEC para começar o processo de polimento nas amostras.



Figura 3.5 - Método de pré-preparação das amostras.

Primeiramente foram lixadas com lixa de diferente granulometria e por fim polidas durante sete minutos, com uma pasta diamantada de 1 micron num equipamento de marca Buehler (Figura 3.6-a).

Após esta operação, as amostras foram tratadas quimicamente com o reagente Nital a 2% (Acido nítrico 2% e etanol 98%), para revelar a sua microestrutura através das fases presentes e fronteiras de grão.

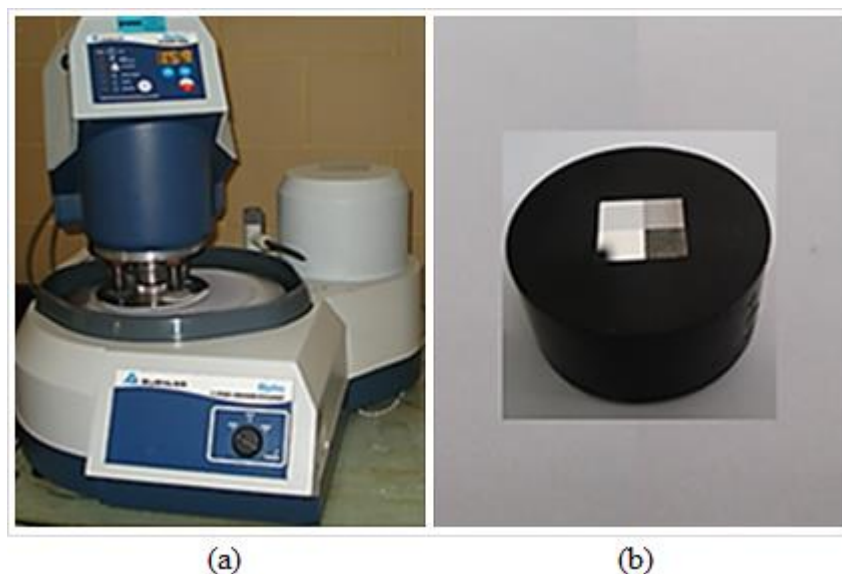


Figura 3.6 - (a) Máquina de polir (Buehler) e (b) amostra atacada quimicamente com reagente de nital.

### 3.3. Microscopia ótica

As análises metalográficas do composto bimetálico (Aço/Babbitt) foram realizadas no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).

Com as amostras devidamente preparadas capturam-se imagens através de um microscópio ótico de marca LEICA DM4000 M LED (Figura 3.7), que permitiram a observação da interface do composto bimetálico e das respetivas ligas metálicas.



Figura 3.7 - Microscópio ótico com ampliação até 1000X.

### 3.4. Microscopia eletrónica de varrimento

A microscopia eletrónica de varrimento (MEV) é um processo capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução que pode ir até às 300000 vezes. Possibilita visualizar diretamente os grãos e as fronteiras de grão, identificando a sua porosidade inter e intragranular. Quando tem acoplado um detetor designado por EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-x), permite determinar a composição química das fases presentes nos materiais, bem com a distribuição dos seus elementos (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Hitachi SU-70 (Hitachi 2014).

A caracterização por MEV foi efetuada no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica na Universidade de Aveiro num equipamento de marca Hitachi SU-70 com uma

resolução de 1nm a 15 kV. A Hitachi SU-70 é um equipamento analítico e alta resolução com potencial máximo de aceleração de elétrons de 30 kV e está equipado com detetores secundários e retrodifundidos que permitiu efetuar microanálise de dispersão de energia de raios-X (EDS, detector Brunker, Quantax 400), de modo a identificar os elementos presentes em cada material.

### 3.5. Dureza Vickers

A determinação da dureza do composto bimetálico foi efetuada com um durómetro modelo EmcoTest® M4C 025 G3 (Figura 3.9-a), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). O método utilizado consistiu em traçar, num provete, três riscos perpendiculares à interface de ligação entre os dois materiais (Figura 3.9-b) para avaliar a dureza no substrato, no revestimento e na ligação de ambos. Como o durómetro só permite utilizar cargas mínimas de 1kg, a viabilidade do processo é dificultada, pois a dimensão da indentação (Figura 3.9-c) é demasiado elevada em relação à espessura da interface que divide os dois materiais (Figura 3.9-d). Esta inviabilidade também está relacionada com a entrada do penetrador nesta zona, isto porque os materiais têm dureza diferente, originando que o penetrador desvie a sua trajetória penetrando com maior facilidade no metal Babbitt (por apresentar menor dureza, o que facilita a entrada do penetrador).

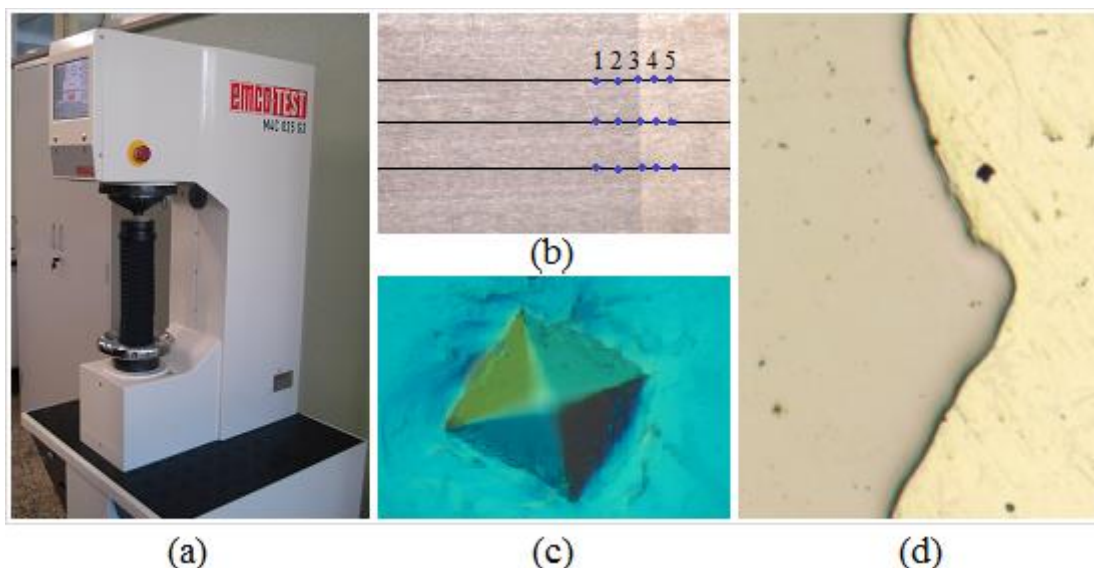


Figura 3.9 - (a) Equipamento para medição da dureza; (b) Trajetória de medição da dureza; (c) Indentação correspondente a uma carga de 1Kgf; (d) Interface Aço/Babbitt.

Contudo, efetuaram-se várias medições para comparar a dureza de cada liga metálica (substrato e revestimento Babbitt), permitindo ficar com uma base de dados para relacionar com outros estudos.

### 3.5.1. Microdureza Vickers

Com o microdurómetro de marca Shimadzu (Figura 3.10-a e Figura 3.10-b), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), efetuaram-se as indentações para determinar a dureza do composto junto da interface e nos microconstituintes de cada liga (aço e Babbitt).

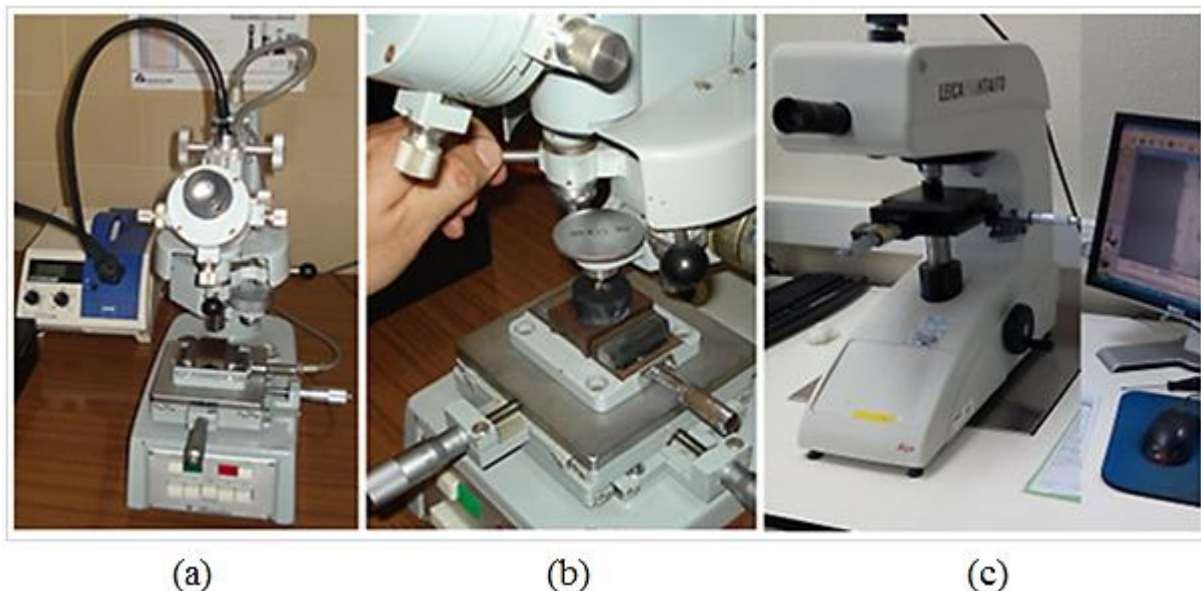


Figura 3.10 - Microdurómetros utilizados nos ensaios de dureza.

A título experimental começou-se por realizar os ensaios com uma carga de 100g, dando resultados um pouco diferentes dos alcançados na macrodureza com 1kg. Essa diferença pode estar relacionada com o tipo de provete usado para determinar os ensaios. Pois o provete escolhido para avaliar a macrodureza continha a superfície retificada (Figura 3.2-b e Figura 3.9-b), enquanto o da microdureza continha a superfície polida (foi uma amostra que se usou na microscopia ótica que estava completamente polida, Figura 3.6-b).

É importante frisar que a amostra não foi atacada na sua totalidade, deixando metade isenta de qualquer reagente químico para efetuar as respetivas medições.

No entanto, a carga de 100g ainda era excessiva, pois esta provocava na zona do metal Babbitt uma indentação bastante acentuada, dando origem a uma divergência de resultados junto da interface. Atendendo a este facto, optou-se por fazer os testes com uma carga de 50g a 15s, obtendo-se assim resultados credíveis.

A mesma carga foi usada para determinar a dureza nos microconstituintes do aço. No entanto, como os microconstituintes do Babbitt são demasiado pequenos (alguns micros) a sua dureza foi obtida através de outro microdurómetro, de marca Leica (Figura 3.10-c), que permitiu efetuar as medições com a carga de 1g.

### 3.6. Ensaio de tração

Os ensaios de tração servem para avaliar as características mecânicas em diferentes materiais. A técnica utilizada provém de um esforço axial, sobre um provete que tende a alongar até à sua rutura. Normalmente os provetes são normalizados, obedecendo a uma única geometria, para que os resultados adquiridos sejam comparados ou reproduzidos.

Atendendo que o objetivo deste trabalho passa por avaliar a adesão entre o revestimento de Babbitt e o substrato de aço, não será necessário efetuar ensaios de tração com provetes normalizados. O que se pretende nesta fase é avaliar a tensão de rutura do composto, para mais tarde após otimização, comparar os resultados obtidos no processo de adesão.

Os ensaios foram realizados em provetes com as seguintes dimensões: espessura 6,13mm e largura 24,03mm.

Sabendo as medidas dos provetes (provetes com dimensões iguais, antes e após otimização do processo, para que os resultados obtidos proviessem de condições semelhantes) e os valores das forças envolvidas nos ensaios de tração, pode obter-se os valores das respetivas tensões em cada ponto através da seguinte equação (equação 3.1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Equação que define o valor da tensão através da razão entre a força (F) e a área resistente (A) do provete. Onde a área (A) é dada pela equação (3.2).

$$A = L \times E \quad (3.2)$$

Com  $L = 24,03 \text{ mm}$  e  $E = 6,13 \text{ mm}$

Devido à pequena dimensão das amostras os ensaios foram realizados no equipamento Hounsfield H20K-W (Figura 3.11) existente no Laboratório do DEM do ISEC.



Figura 3.11 - Equipamento de tração com carga máxima de 2000 kgf.



A escolha deve-se ao facto de conter um tipo de garras (Figura 3.12-a) que permite fixar os provetes adequadamente, visto que estes apresentam na parte do revestimento (metal Babbitt) pouco material para fixação (aproximadamente 12 mm de camada, como realça a Figura 3.12-b).

Com o processo devidamente definido, introduziu-se os parâmetros adequados para realizar os ensaios. Estabeleceu-se a velocidade para 1,5 mm/min e cinco pontos distintos para obter os valores da força após deslocamento do eixo. Cada ponto representa um valor de deslocamento em milímetros (quando o provete é tracionado) ao qual está associado um valor de carga em kgf.

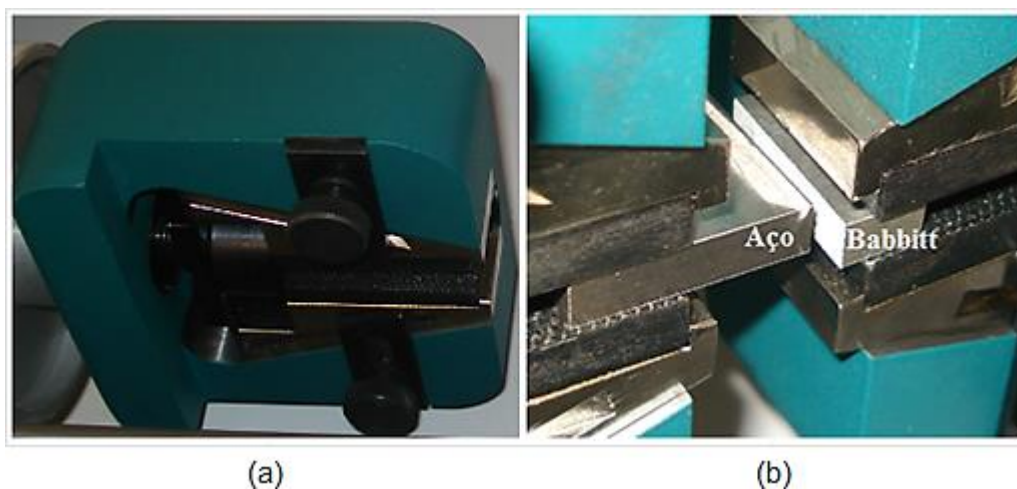


Figura 3.12 - Garra à esquerda e provete separado após ensaio de tração.

Para comparar os valores obtidos anteriormente (nos provetes compostos por Aço e metal Babbitt, Figura 3.12-b), efetuaram-se novos ensaios de tração em provetes feitos apenas de metal Babbitt (Figura 3.13-b).

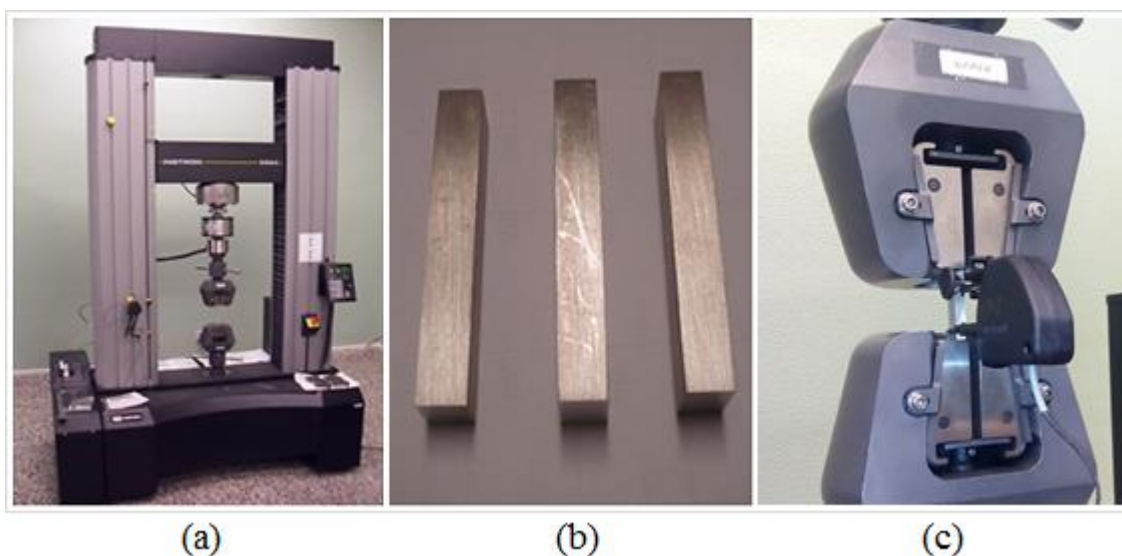


Figura 3.13 - (a) Máquina de tração, (b) provetes de metal Babbitt e (c) garras de aperto com extensómetro.

Os ensaios possibilitam retirar as curvas de tração correspondentes à liga de Babbitt Tego V738, definindo a sua tensão de rutura de modo a relaciona-la com a adesão do composto bimetálico. Estes foram realizados na máquina de tração Instron®, modelo 5584 existente no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC (a velocidade dos ensaios foi de 1,5 mm/min em provetes de espessura 6 mm e largura 12mm).

### 3.7. Rugosidade

A rugosidade é um conjunto de irregularidades com pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. A adesão entre o substrato e o revestimento normalmente não é comprometida pela rugosidade (Comyn 2006). Pois a superfície do substrato deve conter uma grandeza, orientação e grau de irregularidades bem definido para que bloqueio mecânico se processe eficazmente (o grau de entrelaçamento depende da porosidade do material (Comyn 2006)).

Após rutura dos provetes no ensaio de tração, a separação dos dois materiais permitiu avaliar a rugosidade na superfície do substrato. Este processo possibilitou determinar os valores da rugosidade deixados pela maquinação do substrato antes do vazamento do revestimento metal Babbitt.

- ✓ Ra - A rugosidade média representa a média aritmética dos desvios nas asperidades em relação à linha média que divide o perfil em duas superfícies de igual área na amostra.
- ✓ Rz - Representa uma média de profundidade de rugosidade em que corresponde à distância média dos cinco picos mais elevados e dos cinco vales mais profundos na amostra.
- ✓ Rq - O parâmetro rugosidade efetiva ou Rugosidade média quadrática surge com a necessidade de diferenciar superfícies com o mesmo valor de Ra, mas com características diferentes.

As medições foram realizadas no DEM do ISEC com um rugosímetro de marca Mitutoyo modelo Surftest SJ-201P (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo Surftest SJ-201P.

Como frisado, o objetivo principal deste trabalho converge na otimização da adesão entre o substrato de aço e o revestimento de metal Babbitt. Após a realização dos ensaios laboratoriais (mencionados no presente capítulo), obteve-se uma quantidade de informação que permitiu solicitar (à empresa Cruz & Cruz) um novo composto bimetálico para comparação de resultados. O objetivo consistiu em obter o composto bimetálico com várias sugestões de melhoria que possibilitem aumentar a adesão entre o revestimento e o substrato. Deste modo, houve necessidade de se repetir vários processos, onde foram executadas e caracterizadas novas amostras e novos provetes. O método de preparação dos novos provetes/amostras, e obtenção dos resultados, foram adquiridos pelos mesmos métodos referidos ao longo do presente capítulo. Para identificar os compostos bimetálicos, decidiu-se chamar composto bimetálico-1 ao primeiro bloco formado de aço e Babbitt e composto bimetálico-2 ao segundo.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Composição química do composto bimetálico-1

A composição química do composto bimetálico-1 foi determinada através da MEV por EDS. A facilidade de adquirir resultados com boa fiabilidade torna este método muito útil para identificar os constituintes de cada liga. Como se pode verificar na Figura 4.1, os dados obtidos para determinar as composições químicas nas duas ligas foram retirados dentro da zona delimitada pelos retângulos amarelos. Esta técnica tem contudo uma limitação na determinação dos elementos leves, como é o caso do carbono, constituinte do aço.

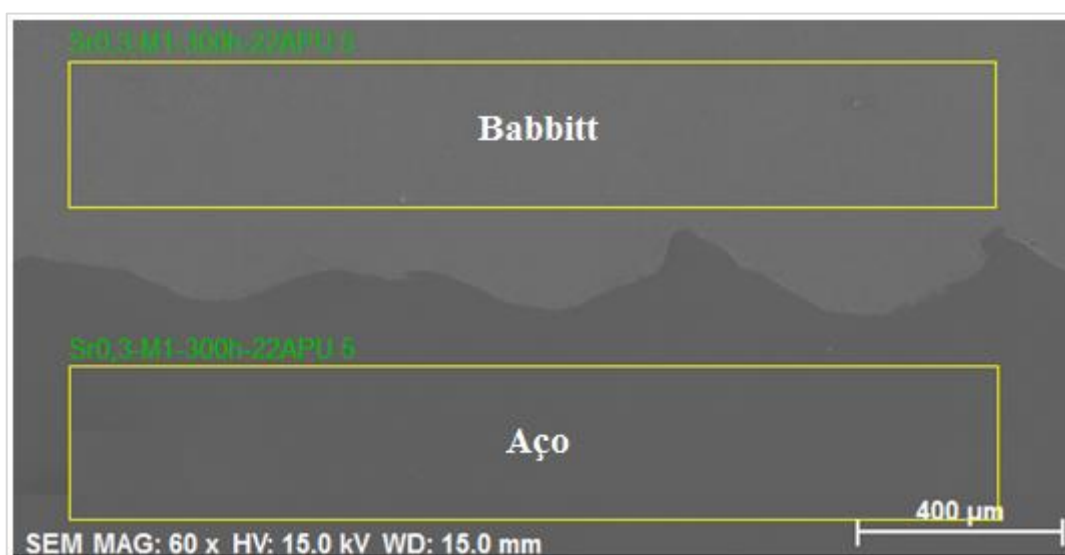


Figura 4.1 - Contornos a amarelo identificam a zona de análise química.

A Tabela 4.1 mostra as percentagens dos elementos que compõe o aço St 52, onde se pode ver que os valores correspondentes ao silício e ao manganésio estão perfeitamente dentro dos parâmetros definidos pelo fabricante (F. Ramada s.d.). É importante frisar que este método não permite determinar a quantidade de carbono (C) presente na liga, devido ao facto deste não ser detetado através desta tecnologia, no entanto, a empresa facultou essa informação (0,2 % de C), mencionando que o substrato pertence à liga de aço DIN St 52.

Tabela 4.1 - Composição química do Aço St 52 - MEV.

Elementos	Percentagem em peso	Percentagem atómica
Ferro	98,71	98,3
Silício	0,41	0,81
Manganésio	0,88	0,89
Total	100	100

Quanto à composição química do revestimento, os valores aproximam-se substancialmente dos que caracterizam as ligas de Babbitt Tego V738 (GmbH 2002-2010). A percentagem de cádmio presente na sua composição revela uma característica fundamental para identificar este tipo de liga (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Composição química do Metal Babbitt – MEV.

Elementos	Percentagem em peso	Percentagem atômica
Estanho	82,81	80,06
Antimónio	11,39	10,74
Cobre	4,04	7,3
Cádmio	1,1	1,12
Chumbo	0,36	0,2
Ferro	0,23	0,47
Arsénio	0,07	0,1
Total	100	100

#### 4.1.1. Babbitt: Microconstituintes e intermetálicos

A microestrutura da liga de Babbitt Tego V738 é composta na sua maioria por estanho, cobre e antimónio (Tabela 4.2). Estes elementos quando se juntam formam compostos intermetálicos (designados nas ligas de Babbitt por cristais semirrígidos) com características fundamentais para estabelecer determinadas propriedades aos revestimentos. Os cristais semirrígidos são compostos químicos que se formam a partir de dois ou mais elementos numa porção fixa bem definida.

De forma a exemplificar as transformações ocorridas no estado sólido e no estado líquido na liga ternária Cu-Sb-Sn apresentam-se os diagramas de equilíbrio ternários correspondentes.

A Figura 4.2 ilustra um diagrama ternário Cu-Sb-Sn na fase líquida onde se pode analisar várias transformações de fases. Traçando a composição química obtida experimentalmente pela MEV (Tabela 4.2), obtém-se as seguintes percentagens em peso: 4%Cu, 12%Sb e 84%Sn. Para esta composição verifica-se que os cristais semirrígidos são oriundos de um domínio com duas fases ( $\eta$  + Líquido) que se formam a 400°C. A 240°C existe nova transformação que dá origem as seguintes fases:  $\beta\text{Sn}+\beta'+\eta$  (ASM 1992).

Relativamente às fases presentes no estado sólido apresenta-se o diagrama ternário Cu-Sb-Sn com a composição em estudo devidamente marcada (Figura 4.3). O domínio trifásico é composto por três fases solidas de  $\beta\text{Sn}+\beta'+\eta'$  provenientes de diferentes domínios adjacentes. No entanto, ao analisar a Figura 4.4, que corresponde a uma pequena porção do diagrama ternário Cu-Sb-Sn no estado sólido, conclui-se que as três fases são formadas por dois compostos químicos de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  (fase  $\eta'$  hexagonal superlativa =  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) e  $\text{SbSn}$  (fase  $\beta'$  cubica de face centrada =  $\text{SbSn}$ ) e uma solução sólida tetragonal de corpo centrado de  $\beta\text{Sn}$  (Glaeser 1992, ASM 1992).

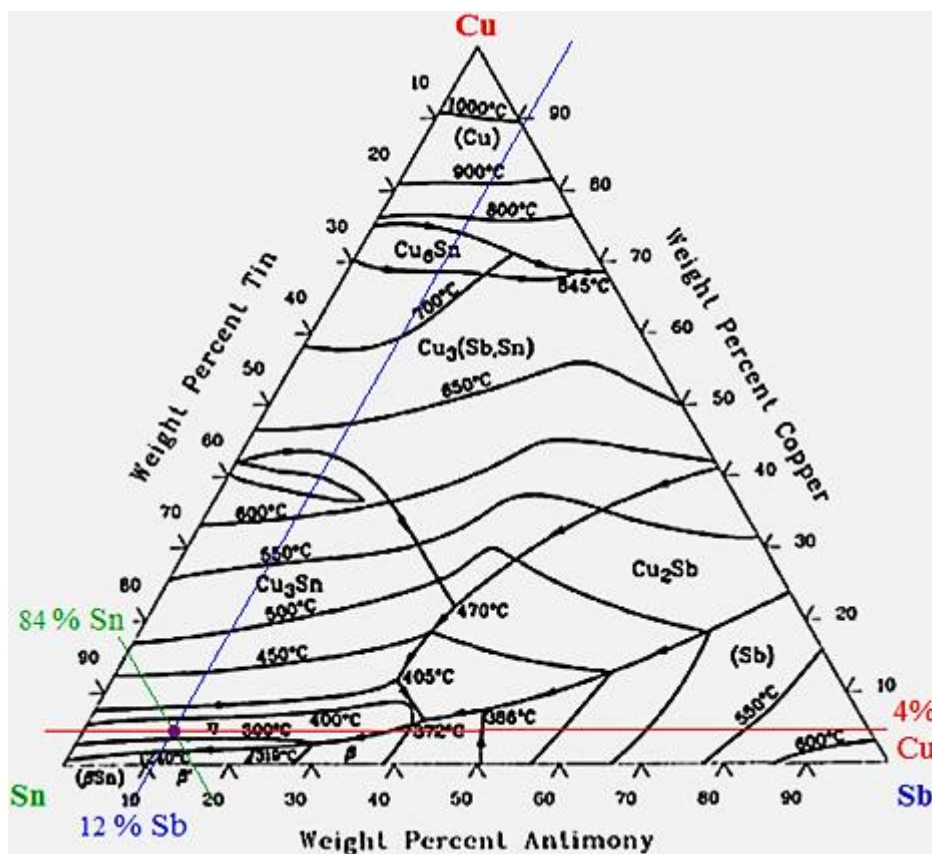


Figura 4.2 - Projeção líquida Cu-Sb-Sn (ASM 1992).

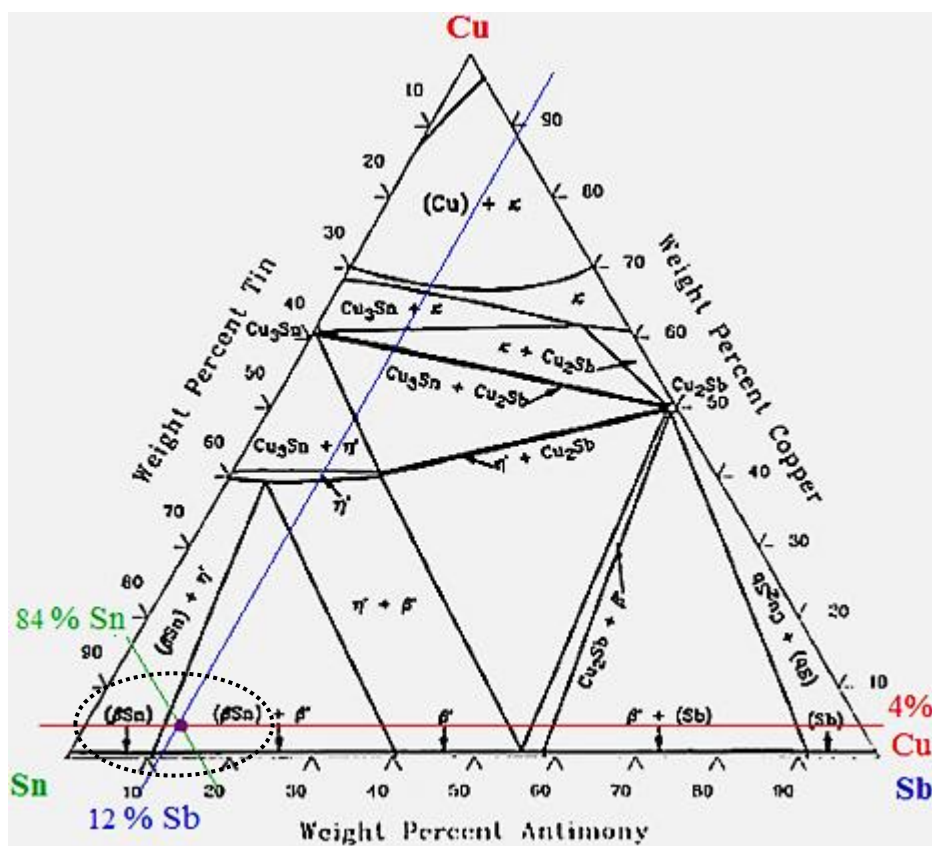


Figura 4.3 - Fases de Cu-Sb-Sn, reações no estado sólido (ASM 1992).

Mais concretamente pode ver-se que a região B (Figura 4.4) corresponde ao domínio trifásico que contém a solução sólida  $\beta\text{Sn}$  (matriz) com um primário de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e um secundário de  $\text{SbSn}$ .

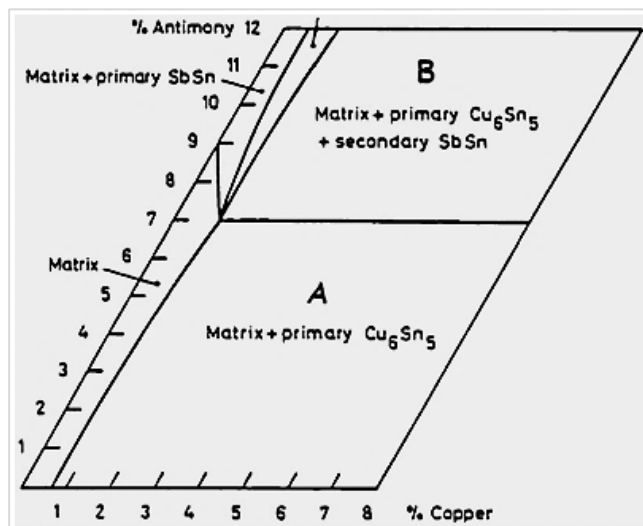


Figura 4.4 - Porção do diagrama de fases Cu-Sb-Sn (Glaeser 1992).

Contudo, a liga de Babbitt Tego V738 contém uma pequena percentagem de cádmio que pode influenciar a sua microestrutura, nomeadamente no que diz respeito à formação de uma nova fase. Para se certificar desse facto, analisou-se uma parte de um diagrama ternário Cd-Sb-Sn, com as seguintes percentagens em peso: 1%Cd, 12%Sb e 87%Sn (equivalência para formar 100%). Como se pode ver (Figura 4.5), para 12% de antimónio (Sb) as fases são compostas por  $\beta\text{Sn}+\text{SbSn}$ .

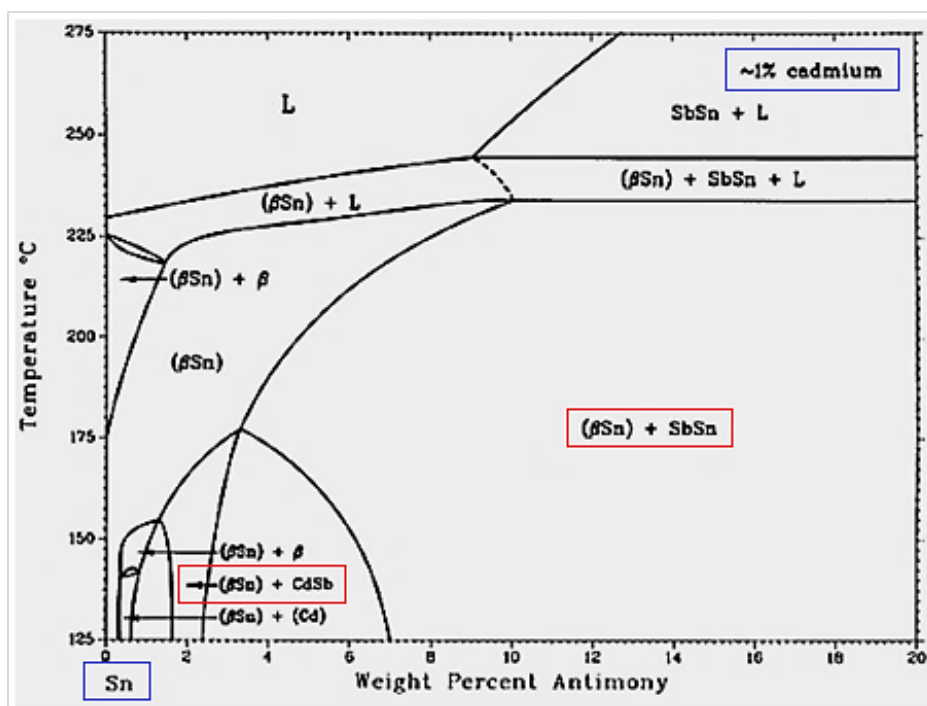


Figura 4.5 - Parte de diagrama ternário Cd-Sb-Sn (ASM 1992).

Apesar do diagrama ilustrado na Figura 4.5 representar as fases a partir dos 125 °C, estas não sofrem grandes alterações até à temperatura ambiente, ou seja, a microestrutura do metal Babbitt Tego V738 não sofre qualquer alteração. Como representa a Figura 4.6 pertencente ao diagrama ternário Cd-Sb-Sn a 20 °C (percentagem de Cd, Sb e Sn em peso) (ASM 1992).

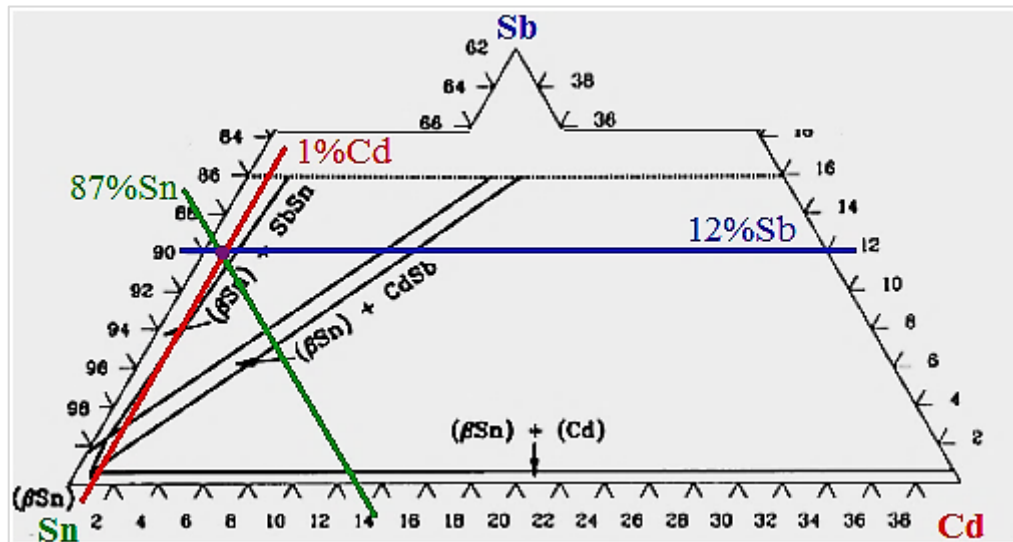


Figura 4.6 - Parte de diagrama ternário Cd-Sb-Sn a 20 °C. Adaptado: (ASM 1992).

Já para a mesma percentagem de cádmio (1% Cd) com o antimónio abaixo dos 7% (3 a 7 % Sb) iria sofrer alterações, ficando a microestrutura composta por uma fase proveniente dos domínios adjacentes ( $\beta$ Sn+SbSn e  $\beta$ Sn+CdSb). A adição de cerca de 1% de cádmio às ligas de Babbitt, melhora a resistência à fadiga e aumenta a dureza das mesmas (Glaeser 1992).

Concluindo, pode afirmar-se que o primário de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e secundário de SbSn são os intermetálicos designados por cristais relativamente rígidos que caracterizam a performance das ligas de Babbitt à base de estanho, concretamente no que diz respeito na sua proteção contra o desgaste (Glaeser 1992). Não obstante, para se retirar essa conclusão de uma forma concreta e eficaz, será necessário avaliar a sua dureza. Quanto à distribuição ao longo matriz e morfologia, foi efetuada uma análise metalográfica através da microscopia ótica, com o intuito de identificar possíveis aspetos que possam influenciar a adesão do metal Babbitt ao aço.

## 4.2. Análise metalográfica

### 4.2.1. Metalografia do Babbitt

Após se conhecer as fases presentes na microestrutura das ligas de Babbitt à base de estanho, será necessário analisar a sua distribuição através de microscopia ótica.

De modo a facilitar a compreensão das imagens obtidas na microscopia ótica, de seguida é exposta uma pequena revisão bibliográfica que permite ajudar a identificar os compostos



químicos ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e  $\text{SbSn}$ ) e a solução sólida tetragonal de corpo centrado ( $\beta\text{Sn}$ ) presente nestas ligas.

A adição até 2% de cobre (Cu) numa liga de estanho-antimónio com o antimónio (Sb) até 8% resulta na formação de agulhas de um primário  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  com alguns interdendríticos eutéticos finos (também de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) e uma solução sólida de antimónio em estanho. Quando a percentagem do cobre aumenta, sucessivamente formam-se maiores quantidades de cristais primários de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Para 4 ou 5% de cobre muitas vezes são produzidas longas agulhas de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .

Nas ligas de Babbitt com antimónio acima de 9% e de cobre com 2%, ou mais, formam-se cuboides  $\text{SbSn}$  que normalmente são nucleados pelas agulhas do primário  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , agulhas ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) que aparecem embutidas dentro, ou passam através dos cuboides de  $\text{SbSn}$ . A exposição destas ligas a elevadas temperaturas, ou durante um tratamento térmico, normalmente tornam os cantos dos cuboides ( $\text{SbSn}$ ) de forma arredondada. Partículas irregulares de  $\text{SbSn}$  precipitam entre os dendritos ricos em estanho e sobre os lados das agulhas primárias de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e dos cuboides de  $\text{SbSn}$  (ASM 2004).

Na Figura 4.7 vê-se um fundo negro que designa a matriz sólida rica em estanho com cuboides de  $\text{SbSn}$  e agulhas de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .

Os intermetálicos de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e  $\text{SbSn}$  são ambos de cor branca, e podem também estar presentes na matriz em pequenas dimensões (ASM 2004).

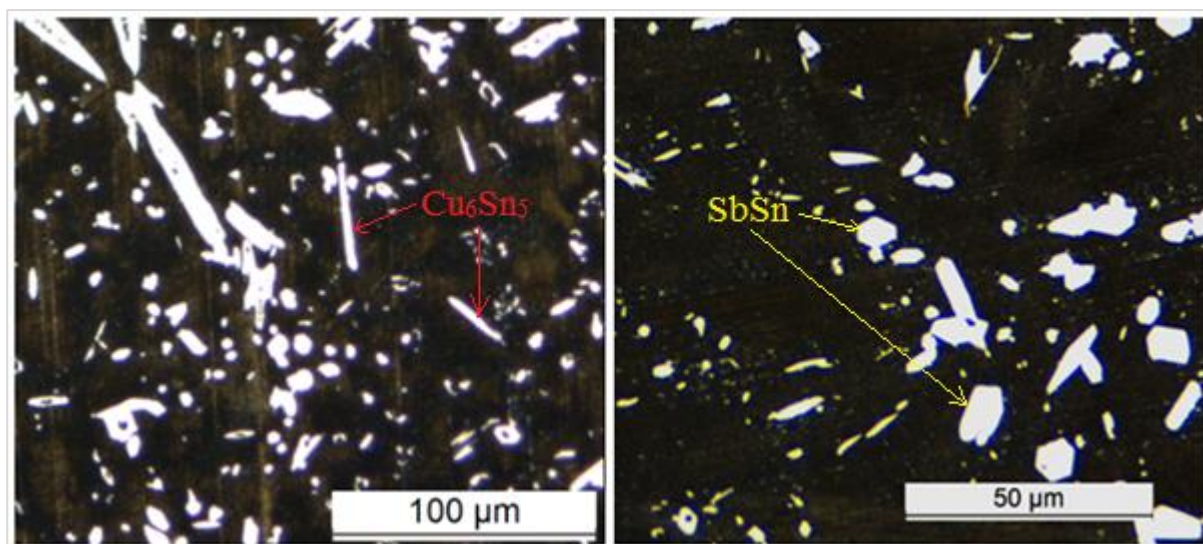


Figura 4.7 - Agulhas de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e partículas cúbicas de  $\text{SbSn}$  (ambos branco) observadas na amostra de Babbitt.

#### 4.2.2. Metalografia do aço

No que diz respeito à microestrutura do aço St52 (0,2%C) não se vislumbra nenhuma novidade, pois como é de conhecimento geral este é composto por uma matriz ferrítica ( $\alpha$ ) de

grãos equiaxiais (zonas claras) e uma fase perlítica ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) de textura alinhada, como realça a Figura 4.8 nas zonas escurecidas.

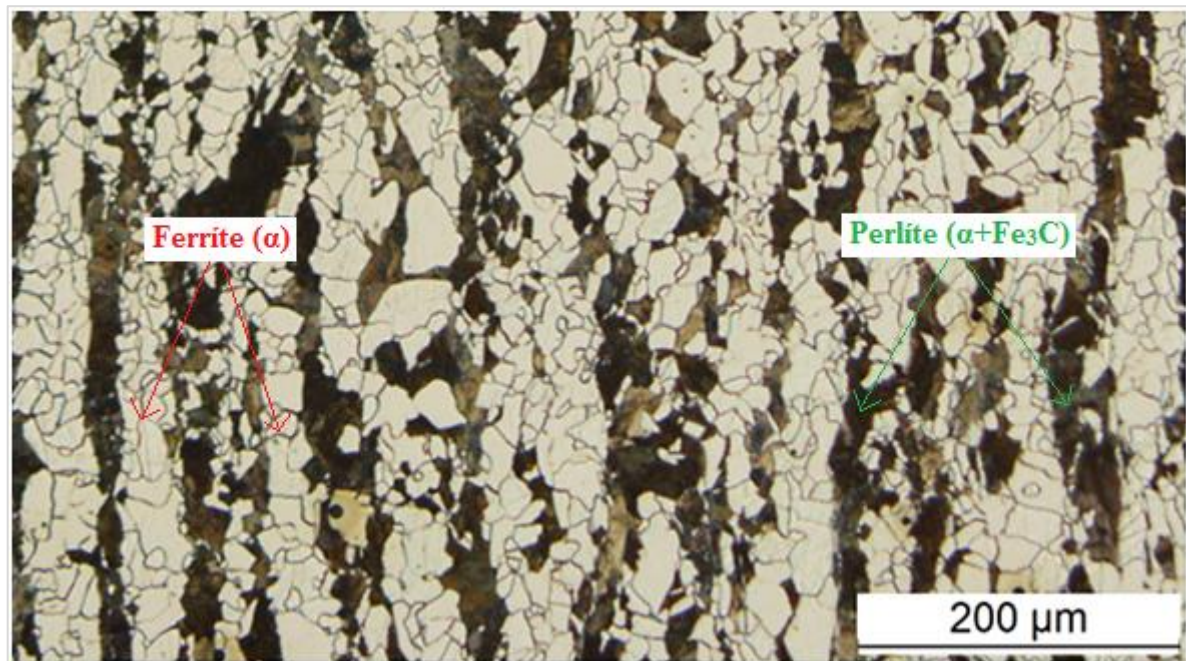


Figura 4.8 - Microestrutura do aço St52, pertencente ao composto bimetálico-1.

Contudo, pode verificar-se que a sua microestrutura contém uma formação alternada de bandas ferríticas e perlíticas, o que não é normal neste tipo de material no estado fornecido. Este mecanismo surge quando o aço é austenitizado, pois os elementos substitucionais de baixa difusividade não são eliminados, o que origina diferentes comportamentos na transformação da austenite, devido às bandas de ferrite e perlite conterem diferentes composições químicas. É normal encontrar este fenómeno em aços normalizados que contenham manganês ou sejam arrefecidos ao ar após laminação a quente (Giorgini 2013).

#### 4.2.2.1. Metalografia do aço junto da interface

A análise metalográfica do composto bimetálico-1, por meio da microscopia ótica, é uma técnica determinante para estudar a microestrutura do aço junto da interface, e assim perceber o seu mecanismo de adesão com o metal Babbitt.

Na adesão de dois materiais deve criar-se condições para que o revestimento adira eficazmente ao substrato – é importante lembrar que no mecanismo de adesão existe um parâmetro fundamental para que ele seja eficiente, designadamente o ataque químico para remover óxidos ou impurezas depositadas sobre a superfície de adesão – a preparação da superfície através de processos de maquinagem, deve ser feita cuidadosamente por forma a proporcionar requisitos capazes de facultar uma adesão perfeita.

Na Figura 4.9 verifica-se que existe uma distorção das bandas de perlite e ferrite (substrato-1), que podem advir de esforços causados pela ferramenta de corte na maquinagem do composto



bimetálico-1. Para além disso, vê-se ainda uma superfície com elevada rugosidade provocada pelo excessivo avanço da ferramenta de corte. Outro fator importante a considerar é o achatamento dos grãos, pois vê-se junto da interface uma compactação na estrutura do aço que pode ser causada pela respetiva maquinação.

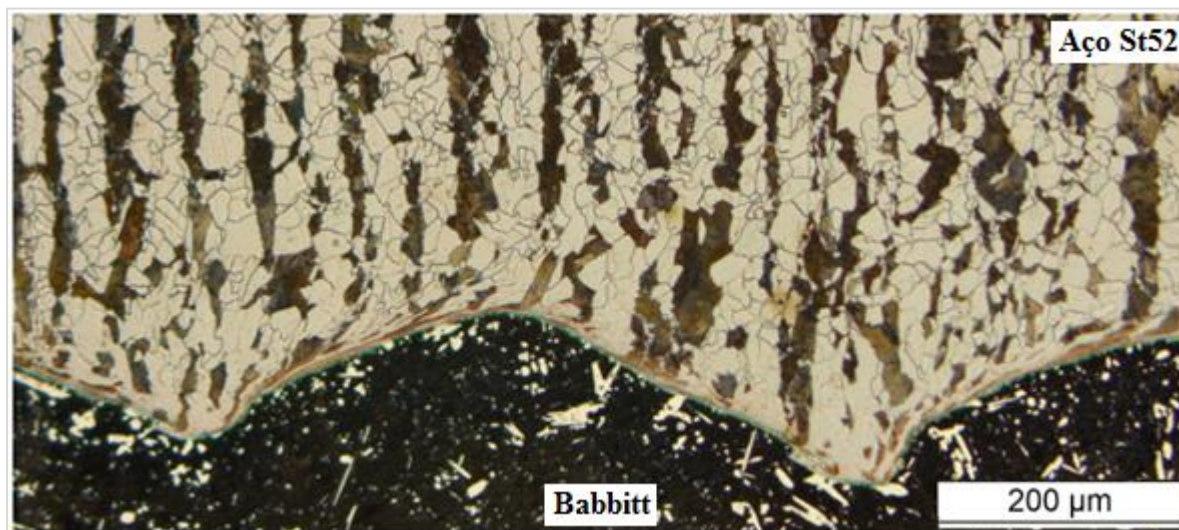


Figura 4.9 - Estado da microestrutura obtida por microscopia ótica junto da interface.

A descoloração ou desbotamento da perlite e a sua continuidade ao longo da interface também evidencia algo de relevante neste processo. Outra particularidade a realçar na perlite, é o facto de nunca contactar o metal Babbitt, devido existir entre ambos uma camada intermédia de ferrite. A Figura 4.10 permite mostrar esta particularidade da perlite, pois verifica-se que perde cor espalhando-se ao longo da interface.

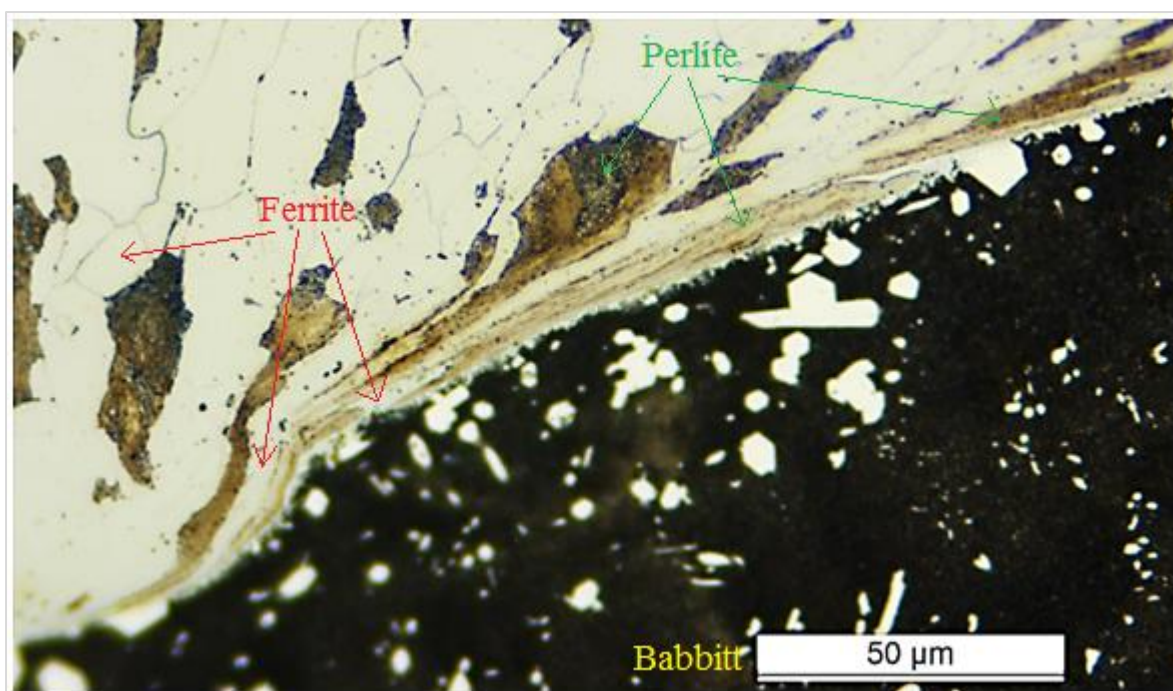


Figura 4.10 - Distribuição da perlite ao longo da interface.



Outro aspeto de realçar é a dificuldade para identificar as fronteiras dos grãos de ferrite, visto que os contornos desaparecem quando se aproximam da interface.

### 4.3. Adesão

#### 4.3.1. Interface observada no microscópio ótico

Na Figura 4.11 observa-se que a ligação do metal Babbitt com o aço é efetuada entre as zonas mais claras do aço e as zonas mais escuras do Babbitt, ou seja, a adesão dos metais é feita pelo entrelaçamento da ferrite com a matriz de estanho que compõe o metal Babbitt. Isto significa que a afinidade destes metais para aderirem está focada apenas na junção do estanho com a ferrite. Observa-se uma interface com cor branca que separa as duas superfícies, aço e metal Babbitt. Outro aspeto que reforça esta ideia são os contornos dos grãos de perlite e dos intermetálicos ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e  $\text{SbSn}$ ), pelo facto de se apresentarem bem definidos sem que haja difusão entre eles.

A caracterização do composto bimetálico-1 possibilita nesta fase retirar algumas conclusões sobre a ligação do aço com o Babbitt, contudo, ainda é uma fase pouco madura, pois será importante estudar o mecanismo de adesão através da microscopia eletrónica de varrimento.

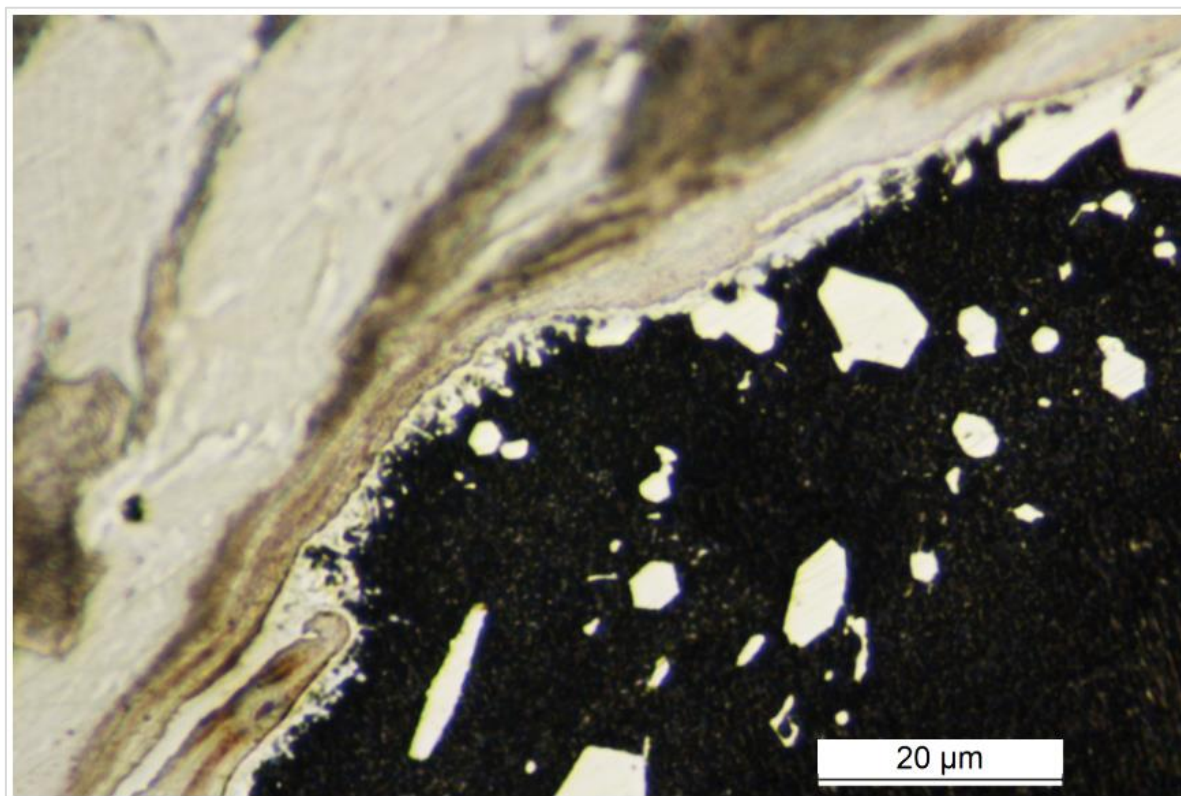


Figura 4.11- Microscopia ótica junto da interface (aço/Babbitt).

#### 4.3.2. Interface observada em MEV

Após os testes realizados nas amostras através da microscopia ótica, efetuou-se microscopia eletrônica de varrimento (MEV). Na Figura 4.12 observa-se que a superfície do substrato contém uma rugosidade elevada. A altura das asperezas tem valores próximos dos dois décimos (183 micros) e o comprimento anda próximo dos cinco décimos (492 micros).

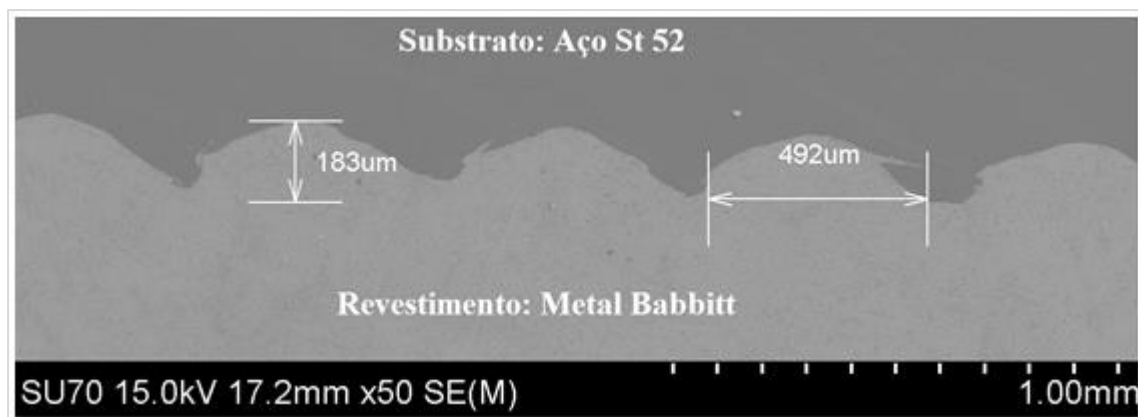


Figura 4.12 - Ampliação da interface do composto bimetálico-1 – MEV 50X, sem ataque químico.

Na Figura 4.13 pode observar-se que existe uma junção perfeita entre os dois metais (substrato e revestimento), com uma interface que permanece continua e isenta de qualquer imperfeição. Ou seja, não contém nenhuma fissura, poro ou irregularidade, significando que o revestimento de metal Babbitt tem uma excelente adesão com o substrato de aço St 52.

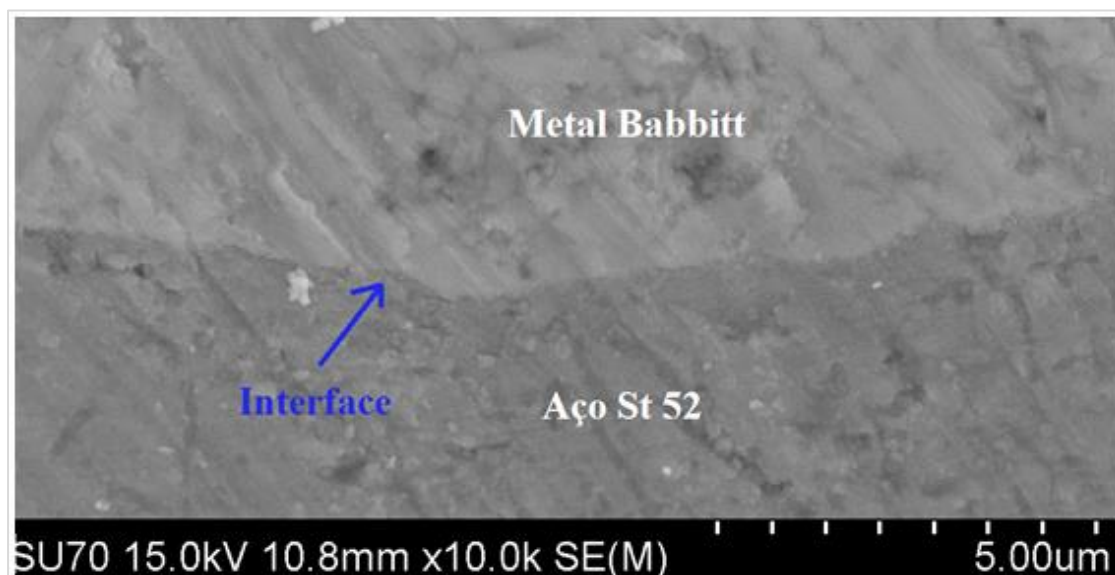


Figura 4.13 - Aspeto da Interface (Aço/Babbitt) – MEV 10000X.

No entanto, ainda não se consegue retirar nenhuma conclusão sobre o mecanismo de adesão. Contudo, deve-se realçar que a rugosidade pode não ser um fator predominante para justificar a excelente adesão que existe entre estes materiais.

#### 4.3.2.1. Mecanismo de difusão na interface

Com a tecnologia da microscopia eletrônica de varrimento (MEV) por EDS é possível identificar detalhadamente os elementos químicos presentes na adesão do composto bimetálico-1. A Figura 4.14 apresenta o mapa de distribuição dos elementos maioritários presentes no aço, nomeadamente o ferro e no Babbitt, i.e. Sn, Sb e Cu. Observa-se uma difusão do ferro na matriz da liga de Babbitt e vice-versa, ou seja, difusão do Babbitt no ferro. Deste modo pode talvez falar-se em interdifusão em ferro e Sn.

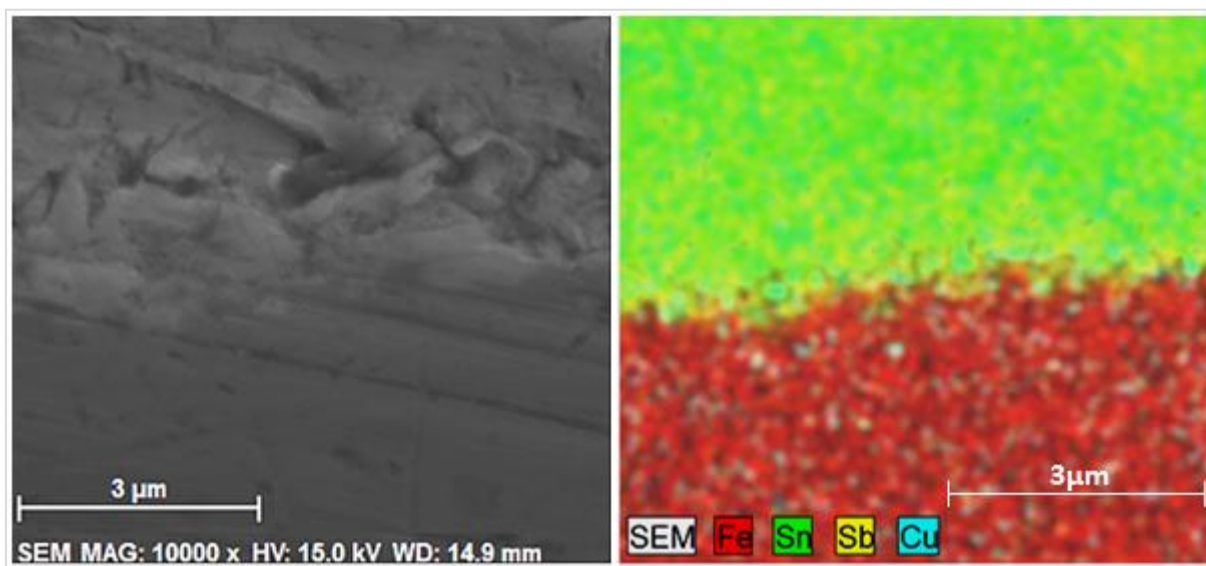


Figura 4.14 - Difusão do Ferro no Babbitt - MEV\_EDS 10000X.

Para realçar o mecanismo de difusão do ferro na matriz de estanho apresenta-se o mapa de distribuição dos dois elementos maioritários, ou seja, do ferro (vermelho) para o aço e estanho (verde) para o Babbitt (Figura 4.15). Desta forma é mais evidente a interdifusão entre o Fe e o Sn na interface.

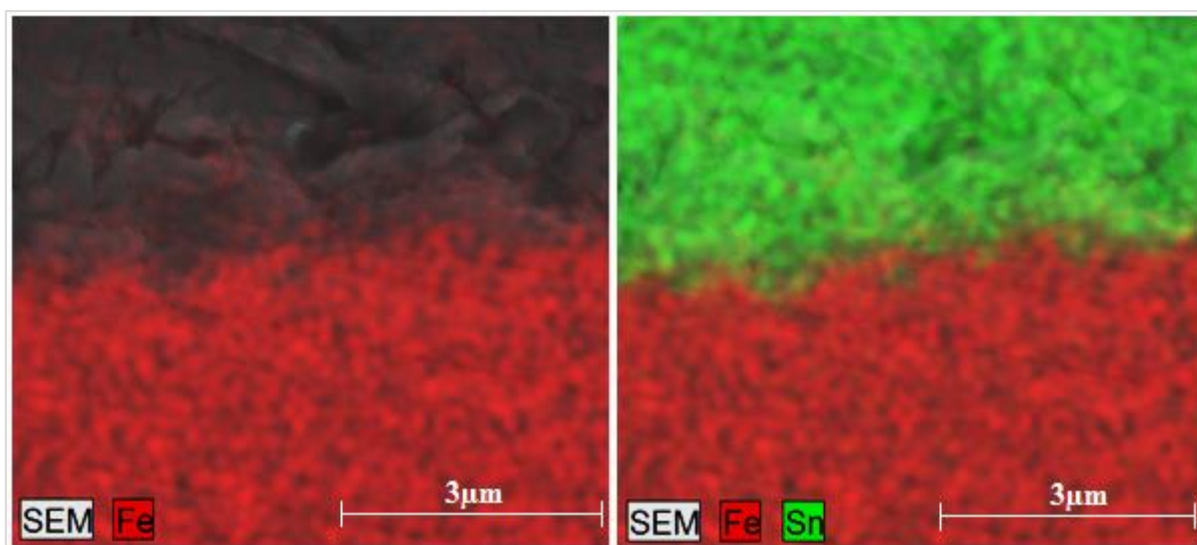


Figura 4.15 - Ferro (cor vermelha) a difundir no estanho (cor verde) - MEV\_EDS 10000X.

A análise das microestruturas obtidas por MEV permite concluir que a adesão do metal Babbitt com o aço é feita através da difusão entre Fe e Sn, apresentando uma ligação aparentemente uniforme. De forma a verificar as fases formadas ou compostos químicos entre os dois elementos, analisou-se o diagrama bifásico Fe-Sn.

Na Figura 4.16 observa-se que para teores de Sn acima de 80% e temperaturas inferiores a 231,9°C, a liga encontra-se num campo bifásico de (Sn) + FeSn<sub>2</sub>. A fase (Sn) é uma solução sólida de Sn com Ferro e a outra fase FeSn<sub>2</sub> é um composto. Quando se faz a leitura do diagrama tem-se de considerar apenas 2 elementos Fe e Sn, o Sn ao fundir dissolve uma quantidade reduzida de Fe e forma a solução sólida (Sn). Para ocorrer difusão atômica é necessário que um dos metais esteja em estado líquido, como é o caso do Sn. Quanto à existência de compostos FeSn<sub>2</sub> na interface entre aço e o Babbitt, podem não ser detetados devido à temperatura de formação dos compostos (513°C) e por se estar em condições de não equilíbrio.

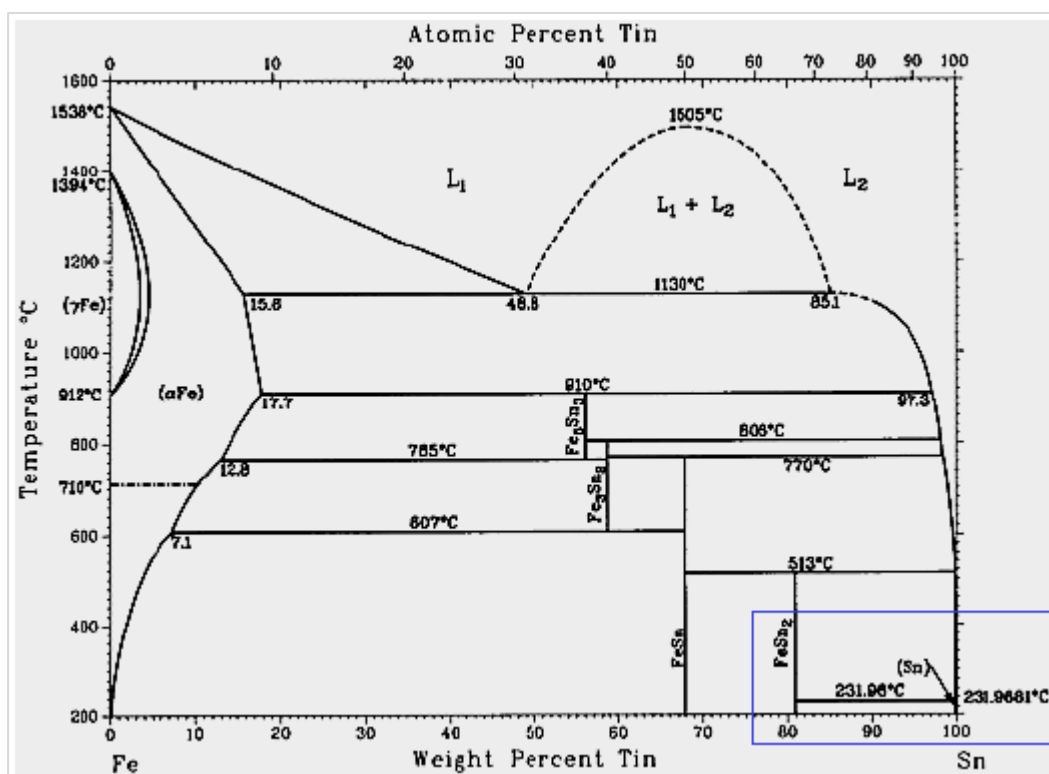


Figura 4.16 - Diagrama binário Fe-Sn (ASM 1992).

#### 4.4. Dureza do composto bimetálico-1

A dureza de cada material/constituente pode influenciar o mecanismo de adesão, pois sabe-se que o aumento da dureza, grande energia superficial ou o módulo de elasticidade tende a dificultar a adesão dos metais (Stachowiak e Batchelor 2000). Nesse sentido, será realizado um estudo aprofundado da dureza em vários pontos-chave com o intuito de esclarecer algo de importante que possa advir desse fenómeno.



#### 4.4.1. Macro dureza junto da interface

Na Figura 4.17 analisa-se a média e o desvio padrão das indentações efetuadas em cada ponto referenciados entre 1 a 5, correspondentes à seção entre o aço e o Babbitt (Figura 3.9-b). A média das medições obtidas no aço andou muito perto dos 207HV com um desvio padrão máximo no ponto 2 de 3,56HV, enquanto o metal Babbitt rondou os 30,15HV, com desvio máximo de 0,43HV.

Já no que diz respeito às medições efetuadas na junção dos dois metais (interface) houve uma divergência de resultados, como se esperava, devido ao fato do penetrador começar a penetrar mais perto ou mais afastado do metal base (Aço St52, de maior dureza). A média na interface foi de 105HV e o desvio padrão de 38HV.

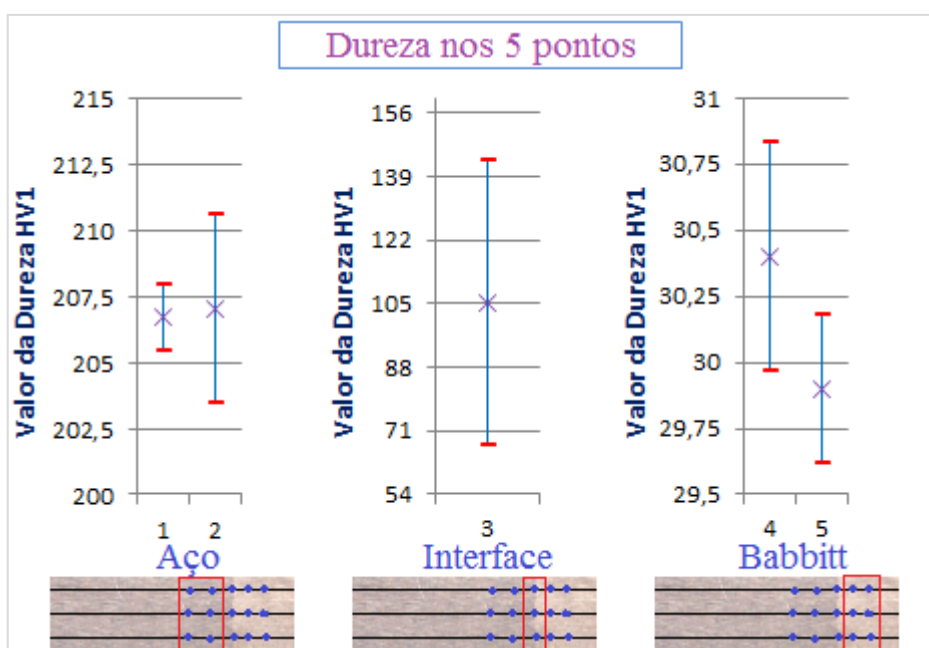


Figura 4.17 - Média e desvio padrão da dureza.

Tabela 4.3 - Média e desvio padrão em cada ponto.

Ponto	Média	Desvio padrão	Desvio Sup	Desvio Inf
1	206,7	1,25	207,95	205,45
2	207	3,56	210,56	203,44
3	105	38,05	143,05	66,95
4	30,4	0,43	30,83	29,97
5	29,9	0,28	30,18	29,62

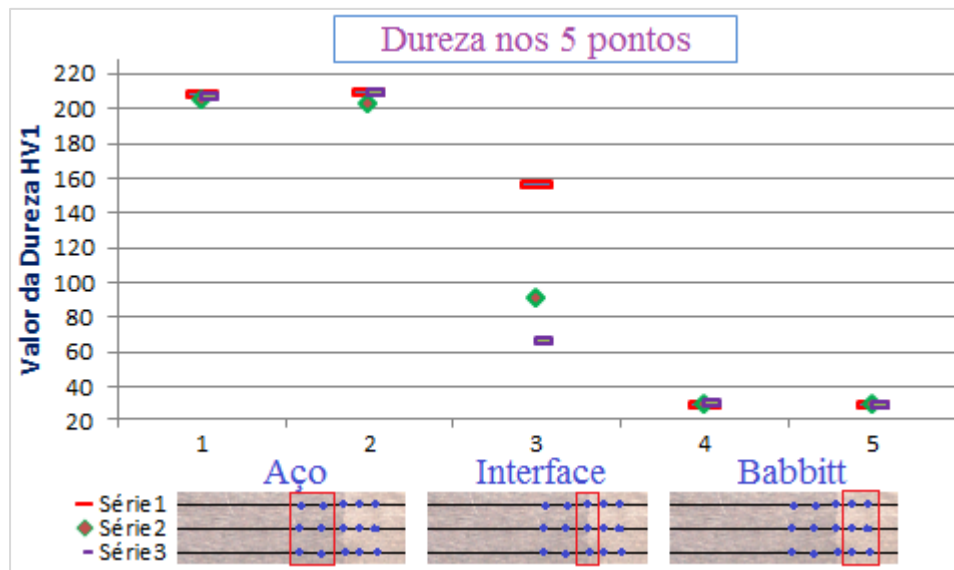


Figura 4.18 - Valor da dureza nos 5 pontos.

Para analisar mais detalhadamente a dureza junto da interface, foi necessário realizar ensaios que possibilitam obter indentações relativamente pequenas. A microdureza é um processo que permite satisfazer essas condições, uma vez que permite avaliar nessa região, a dureza dos diversos materiais e dos microconstituintes que os compõem.

#### 4.4.2. Microdureza junto da interface

A Figura 4.19 ilustra as indentações efetuadas pelo penetrador, com distâncias bastante pequenas.

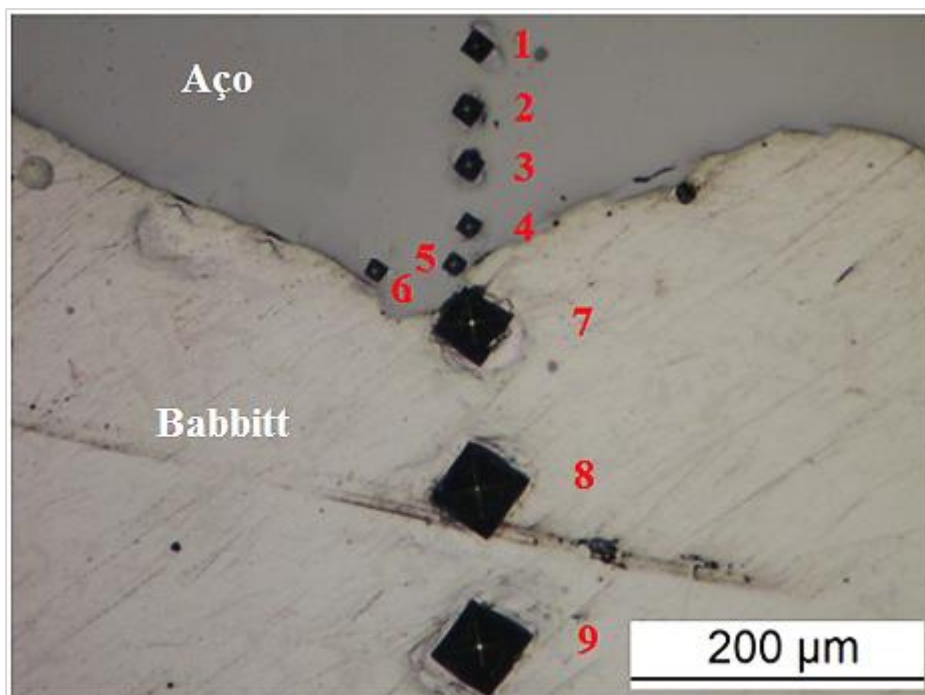


Figura 4.19 - Indentações realizadas no aço e no Babbitt com carga de 50g.

A indentação identificada com o número um (nº1) tem de largura cerca de vinte micros e a número nove (nº9) perto de sessenta e cinco micros.

O ensaio de microdureza foi realizado com uma carga de 50g a 15s de forma a percorrer um perfil de dureza entre o aço e o Babbitt. Uma característica importante a reter neste processo é a área das indentações quando se aproximam da interface (no aço), uma vez que tendem a diminuir, significando um aumento de dureza nesse sentido. Esta tendência revela que ocorre nesta zona algo que pode estar relacionado com a deformação dos grãos junto da interface, conforme observado nas imagens obtidas na microscopia ótica (ver Figura 4.10) – a deformação deve-se ao processo de maquinação que provoca uma distorção nos grãos da liga de aço, obrigando-os a reduzir de tamanho com consequência no aumento das tensões nessa área – o espalhamento da perlite também pode contribuir para o aumento de dureza.

Quanto à liga de Babbitt, verifica-se uma diminuição da área na indentação nº 7 que pode ser causada pelo contacto do penetrador com o aço. Este facto leva que o Babbitt tenha um aumento de dureza nessa região, contudo, também pode ser provocado pela difusão dos átomos da ferrite e pela concentração dos intermetálicos (ver Figura 4.10).

A Figura 4.20 ilustra o comportamento da microdureza junto da interface, onde se nota perfeitamente a tendência de subida. As durezas mais elevadas correspondem ao aço e as de menor valor ao metal Babbitt.

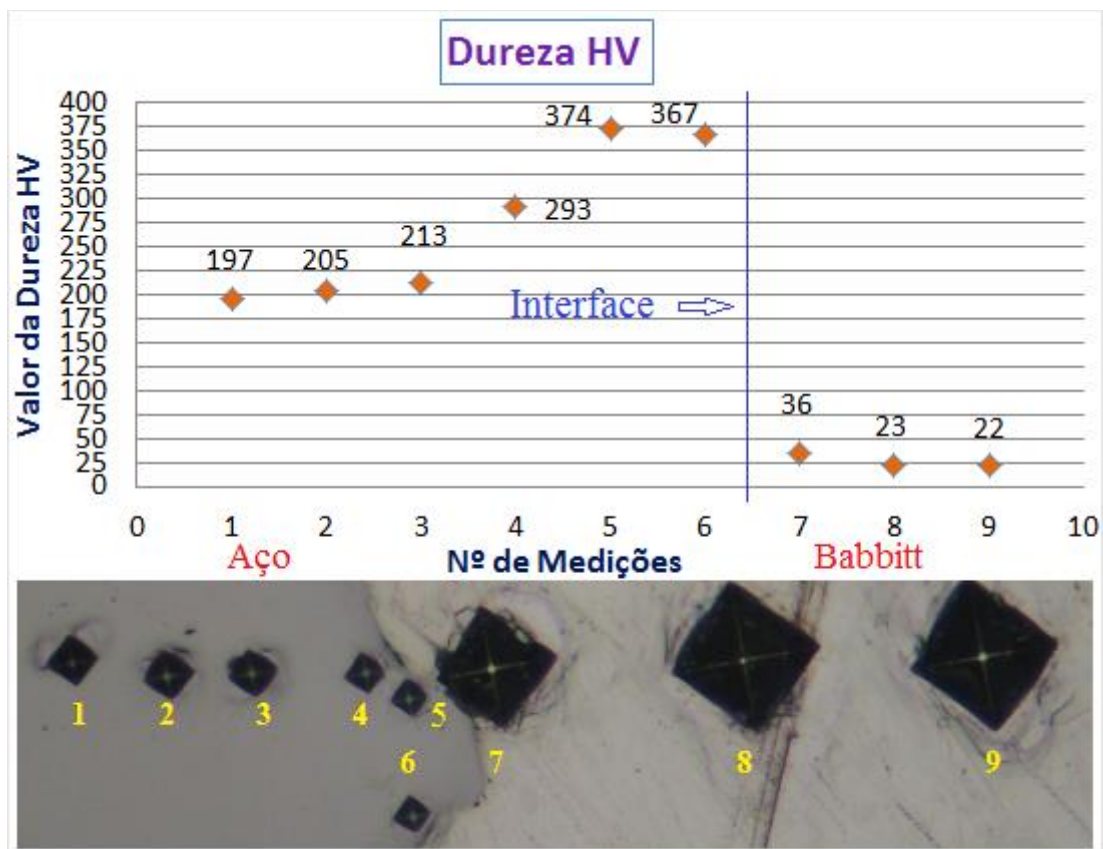


Figura 4.20 - Microdureza junto da interface no aço e no Babbitt com carga de 50g.

Com os testes de microdureza realizados, comprova-se que as medições efetuadas com a carga de 1kg (Figura 4.18) transmitem uma ideia completamente errada da dureza junto da interface, pois como se pode ver na Figura 4.20, o comportamento do aço tende a aumentar significativamente quando se aproxima do metal Babbitt.

#### 4.5. Microdureza nos microconstituintes do composto bimetálico-1

##### 4.5.1. Microdureza da microestrutura do aço

Como foi referido, a preparação da superfície do substrato proporciona grandes alterações na sua estrutura granular. Para se perceber mais detalhadamente quais as causas que advêm desse feito, nomeadamente no processo maquinação, decidiu-se avaliar a microdureza dos microconstituintes que compõem o aço na zona de adesão.

Vários estudos revelam que um aço composto por 0,2 % de carbono, sem tratamento térmico, contém na sua microestrutura grãos de ferrite com dureza perto dos 95HV e grãos de perlite grossa a rondar os 200HV (UAM s.d.) – esta realidade possibilita comparar a dureza da ferrite e da perlite na zona da interface.

Para se proceder o estudo, realizaram-se sete ensaios de dureza nos microconstituintes da liga em aço, os quais foram identificados e numerados conforme ilustra a Figura 4.21.

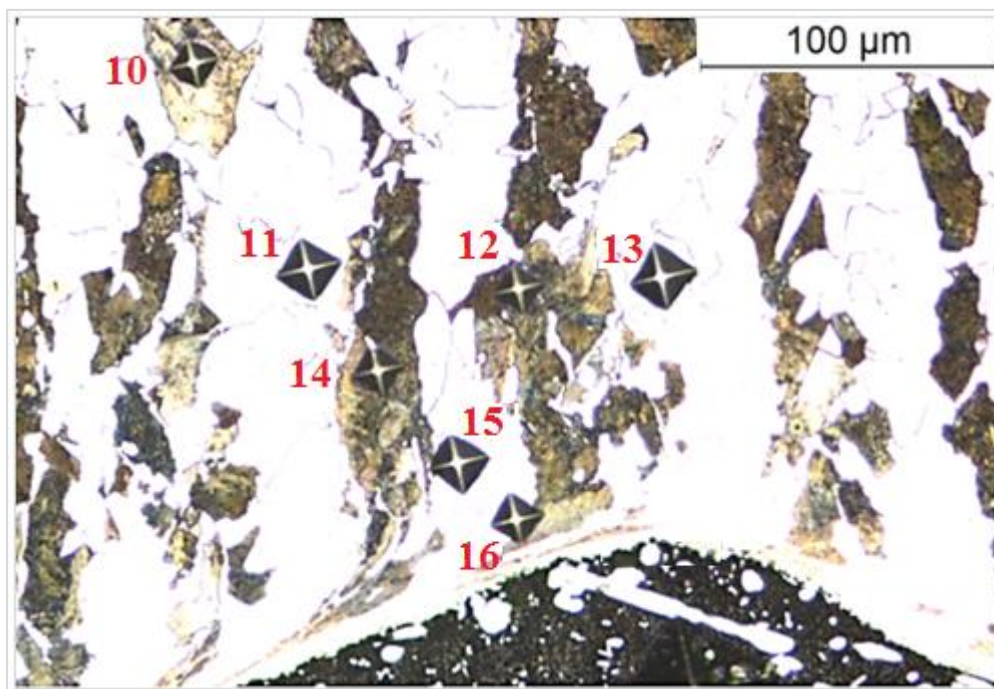


Figura 4.21 - Pontos avaliados na microdureza com carga de 50g a 15s.

Após obtenção dos valores verificou-se que, tanto a dureza da ferrite, como a da perlite, estava significativamente desfasada da realidade (Tabela 4.4).



Tabela 4.4 - Dureza dos microconstituintes a 0,2 mm da interface.

Ponto	Dureza (HV)	Microconstituente
10	218,45	Perlite
11	161,21	Ferrite
12	234,08	Perlite
13	156,73	Ferrite
14	231,87	Perlite
15	186,91	Ferrite + Perlite
16	250,03	Ferrite + Perlite

Os pontos 11 e 13 realçam a dureza da ferrite, a qual contém um aumento bastante considerável, podendo superar os 65%. Quanto à perlite o aumento é menos perceptível, cerca dos 15%, como definem os pontos 10,12 e 14.

É importante realçar que o ponto 10 está afastado da interface cerca de 200µm, enquanto os pontos 12 e 14 estão perto dos 100µm. Contudo, este afastamento não revela grande diferença na sua dureza, ou seja, a perlite mantêm-se praticamente inalterada.

Já nos pontos 15 e 16 o caso é diferente, o ponto 15 que está cerca de 50µm da interface mostra que a dureza da ferrite sobe demasiado nessa zona. Esse aumento pode ser influenciado pelo contacto da indentação na perlite, no entanto, como o contacto é demasiado pequeno não deve interferir no resultado obtido. O mesmo acontece com o ponto 16, este que está ainda mais perto da interface, pois sobe abruptamente ultrapassando a dureza da perlite, o que não deveria acontecer devido a indentação envolver uma grande parte da ferrite (a ferrite tem menor dureza). Assim confirma-se que o substrato aumenta de dureza quando se aproxima da interface.

#### 4.5.2. Microdureza na microestrutura do metal Babbitt

A estrutura do metal Babbitt é conhecida por conter uma matriz de liga macia, onde estão embebidos pequenos cristais relativamente rígidos designados por  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e  $\text{SbSn}$ . Estes cristais são essenciais para realçar as características do metal Babbitt, apresentam uma rigidez bastante acentuada o que permite dar consistência na performance do mesmo quando usado em revestimentos de chumaceiras.

De modo a justificar estas afirmações, a Figura 4.22 mostra uma distribuição dos intermetálicos ao longo da matriz de estanho com as respetivas indentações que permitem identificar as suas durezas.

Nos intermetálicos de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , a microdureza é evidenciada pelo elevado valor que a caracteriza, apresentando registos próximos de 350HV. Já os intermetálicos de  $\text{SbSn}$  rondaram os 104HV.

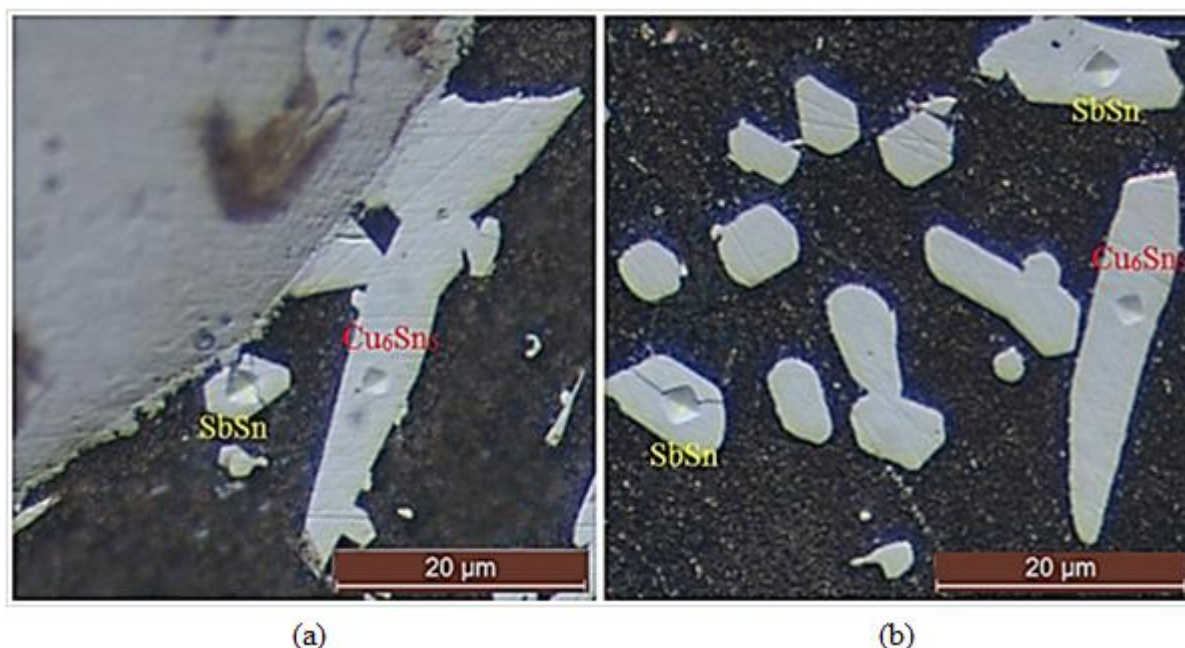


Figura 4.22 - Indentações nos intermetálicos  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  e  $\text{SbSn}$ , junto e afastado da interface.

É importante mencionar que devido à reduzida dimensão dos microconstituintes, a carga usada nos ensaios foi de um grama (1g), provocando indentações muito pequenas com valores na ordem dos  $2\mu\text{m}$ . No entanto, também se pode concluir que apesar dos microconstituintes de  $\text{SbSn}$  apresentarem uma dureza de 104HV, estes contêm pouca tenacidade, e isso é bem visível na Figura 4.22 pelo facto de mostrar que estes fissuram quando o penetrador perfura a sua camada superficial.

Outro aspeto fundamental de frisar é a igualdade de dureza nos intermetálicos da mesma espécie, visto que os que estão junto da interface apresentam valores iguais aos restantes espalhados pela matriz de estanho (Figura 4.22 a e b). Como não existe qualquer alteração na dureza destes microconstituintes, pode justificar-se que o processo de adesão não acarreta qualquer alteração nas propriedades dos compostos químicos presentes no metal Babbitt.

#### 4.6. Propriedades avaliadas no ensaio de tração

De forma a elucidar o comportamento dos provetes nos diversos ensaios, a Figura 4.23 mostra as respetivas curvas de tração obtidas com provetes de dimensões padronizadas (ver seção 3.6 no capítulo 3).

O comportamento observado é semelhante em todas as curvas, sendo o regime elástico bem identificado e o regime plástico quase inexistente. O comportamento plástico reduzido deve-se ao facto dos provetes romperem (separação do aço com o Babbitt) quando o domínio elástico atinge o seu limite máximo.

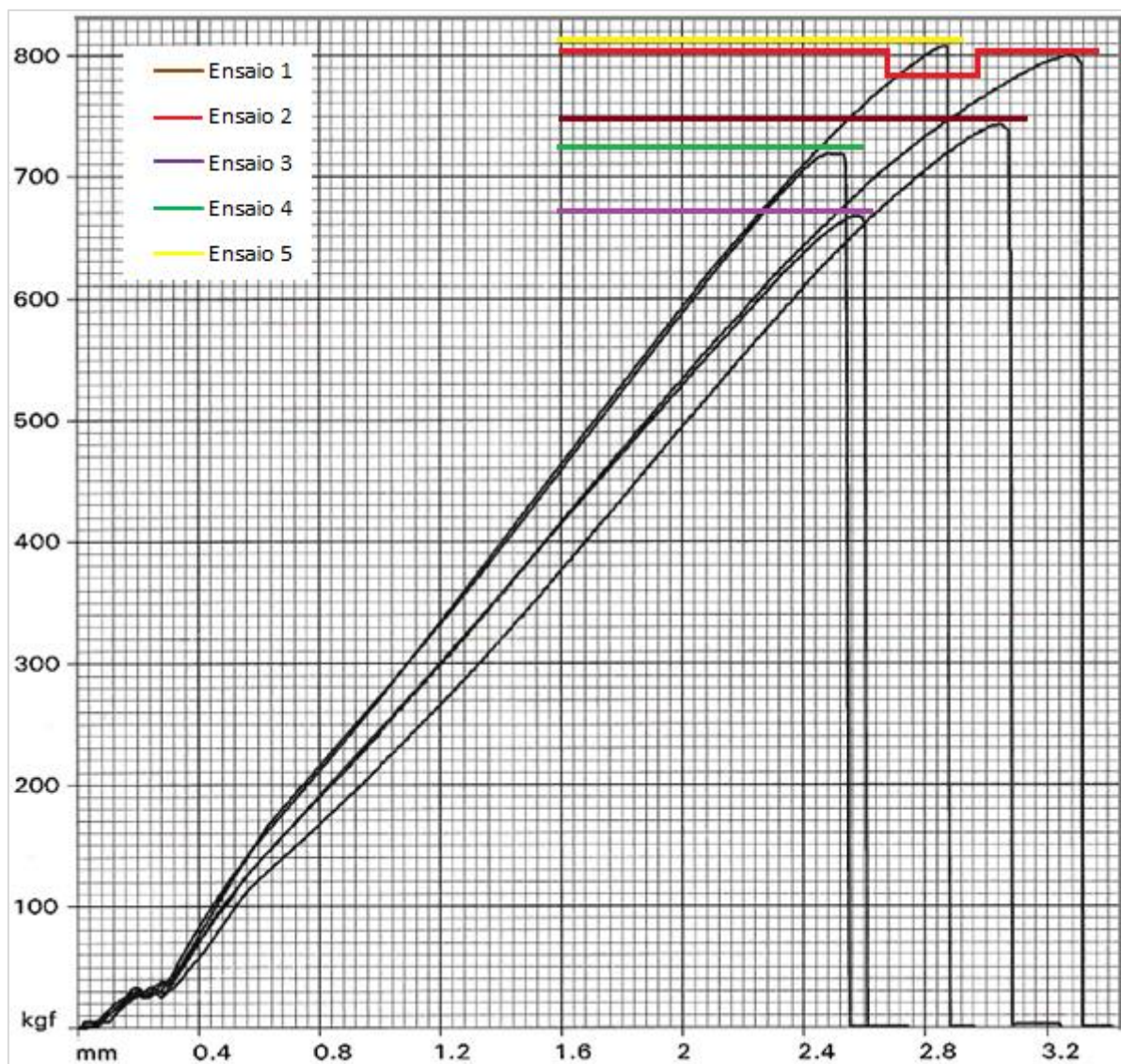


Figura 4.23 -Curvas força vs alongamento obtidas com ensaio de tração.

Na Tabela 4.5 estão colocados os valores de força correspondentes aos deslocamentos com intervalos de 0,5 mm para os 5 ensaios realizados.

Tabela 4.5 - Valores da força e deslocamento registados em pontos específicos durante os cinco ensaios realizados.

	Força (kgf)					
	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	Máx.
Ensaio 1	92,998	215,840	347,382	494,154	635,622	743,576
Ensaio 2	105,370	243,847	385,452	533,990	667,098	800,816
Ensaio 3	105,642	245,071	385,044	528,281	657,648	667,913
Ensaio 4	115,907	272,128	425,085	587,491	718,219	719,104
Ensaio 5	119,374	270,972	430,184	592,251	734,603	808,838
Média	107,858	249,572	394,629	547,233	682,638	748,049

Como se pode ver, para um deslocamento de 0,5 mm a média aproxima-se dos 107,9 kgf, enquanto após rutura dos 5 provetes (separação do aço com o Babbitt), o valor médio máximo apresenta 748 kgf. É importante chamar à atenção que em todos os ensaios a rotura do composto bimetálico ocorreu na interface de ligação do aço ao metal Babbitt, sendo por isso possível observar nesta altura a superfície do aço sobre a qual foi realizada a deposição do metal Babbitt.

O valor da força não é o método adequado para comparar a resistência à tração do composto bimetálico, pois o que deve ser avaliado é o desempenho da tensão de rutura, visto que esta pode ser comparada com outros resultados.

Uma vez que os valores das forças foram obtidos em kgf, houve necessidade de os converter em Newton (N), para obter os resultados em  $\text{N/mm}^2$  (MPa) como ilustra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores das tensões nominais para cada ponto.

Tensão (MPa)						
	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	Máx.
Ensaio 1	6,193	14,374	23,135	32,909	42,331	49,520
Ensaio 2	7,017	16,239	25,670	35,562	44,427	53,332
Ensaio 3	7,035	16,321	25,643	35,182	43,797	44,481
Ensaio 4	7,719	18,123	28,309	39,125	47,831	47,890
Ensaio 5	7,950	18,046	28,649	39,442	48,922	53,866
Média	7,183	16,621	26,281	36,444	45,462	49,818

A Figura 4.24 apresenta as curvas de tensão para cada ensaio, obtidas com base nos pontos de força e alongamento apresentados na Tabela 4.6.

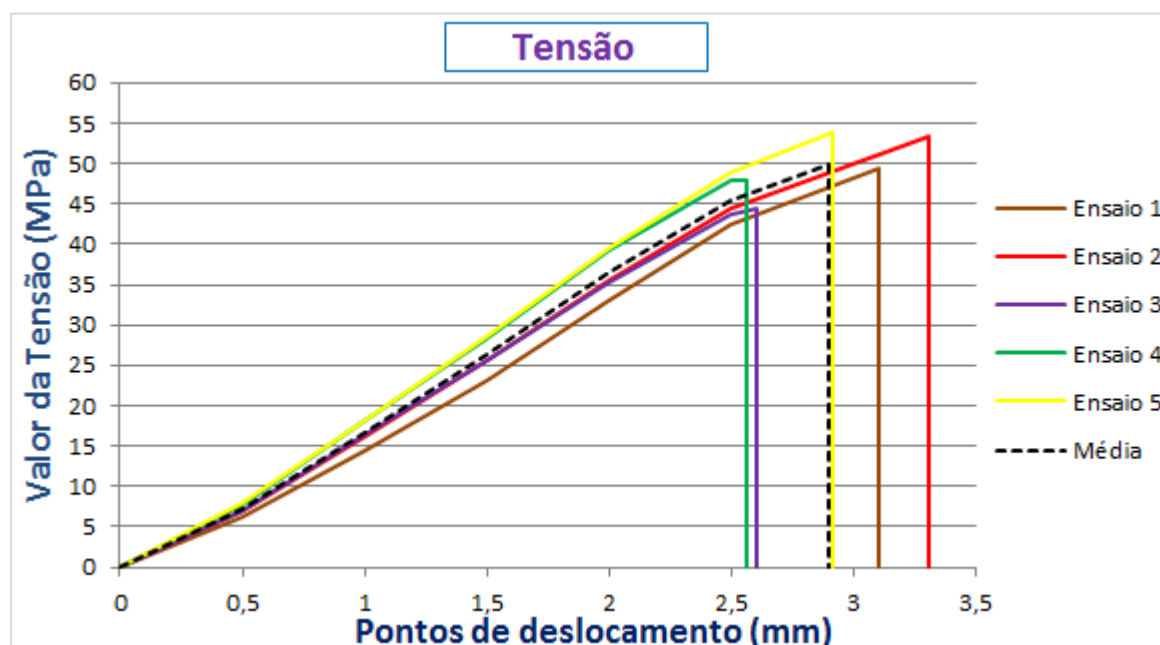


Figura 4.24 - Curvas de tensão nominal vs deslocamento.



Desde já pode dizer-se que a adesão entre o metal Babbitt e o aço é bastante forte, visto que a tensão máxima exigida para separar os dois metais apresenta valores significativos, comparando com as propriedades mecânicas das ligas de Babbitt (ver secção 2.3.7.3 no capítulo 2).

#### 4.7. Rugosidade na superfície do substrato-1

Após realização dos ensaios de tração, observou-se a superfície de fratura nos provetes, e que corresponde à interface aço/metal Babbitt (setas azuis na Figura 4.25 indicam as faces de separação). A Figura 4.25 mostra o perfil de rugosidade obtido após o apalpador percorrer 12 mm na superfície do aço (seta azul do lado esquerdo mostra a superfície do substrato) e a Tabela 4.7 os respetivos valores.

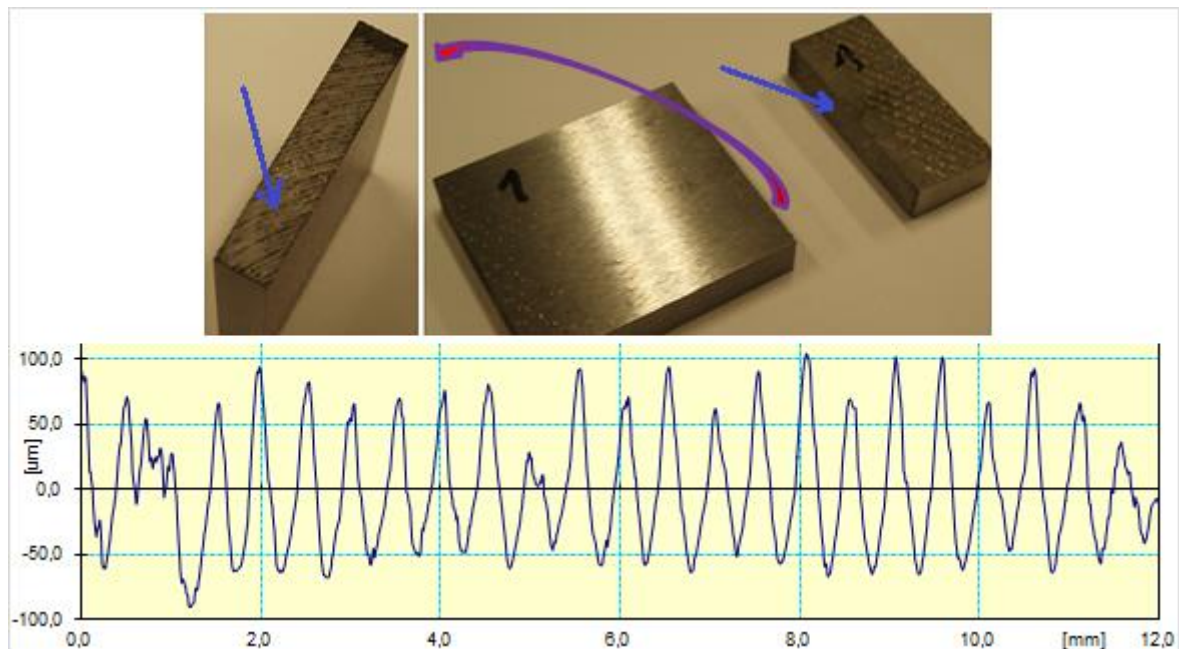


Figura 4.25 - Provette separado e perfil de rugosidade do substrato.

A rugosidade  $R_z$  que representa a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos assemelha-se ao valor mencionado na Figura 4.12 (183 micros), tal como era esperado.

Tabela 4.7 - Valores de rugosidade nos cinco provetes.

Provette	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
1	37,27	163,9	44,19
2	36,5	162,3	42,2
3	28,93	135,4	33,75
4	34,86	162,8	41,1
5	38,89	184,7	46,17
Média	35,29	161,82	41,482

## 4.8. Otimização do processo de adesão

Para otimização do processo de adesão, foi proposto à empresa que forneceu o composto bimetálico-1, modificar o método de preparação do metal base (substrato). Nomeadamente, com base na experiência adquirida pela empresa, foi proposto efetuar sobre a superfície de adesão a projeção de granalha, após a superfície ter sido maquinada e atacada com reagentes químicos.

### 4.8.1. Ensaios de tração após otimização

A partir do novo composto bimetálico aqui designado por composto bimetálico-2, fornecido pela empresa com as devidas alterações, prepararam-se novos provetes para realizar os ensaios de tração. Estes ficaram com as dimensões iguais aos estudados anteriormente, de modo a permitir comparar os resultados. Como o objetivo principal deste trabalho está relacionado com a melhoria de adesão, optou-se por efetuar primeiramente os ensaios de tração. Assim, se os resultados fossem favoráveis avançar-se-ia com o estudo pormenorizado, de modo a compreender quais as causas que contribuíram para esse facto.

A Figura 4.26 mostra que os resultados foram surpreendentes, pois a força necessária para separar o metal Babbitt do aço foi bastante superior à registada nos provetes iniciais.

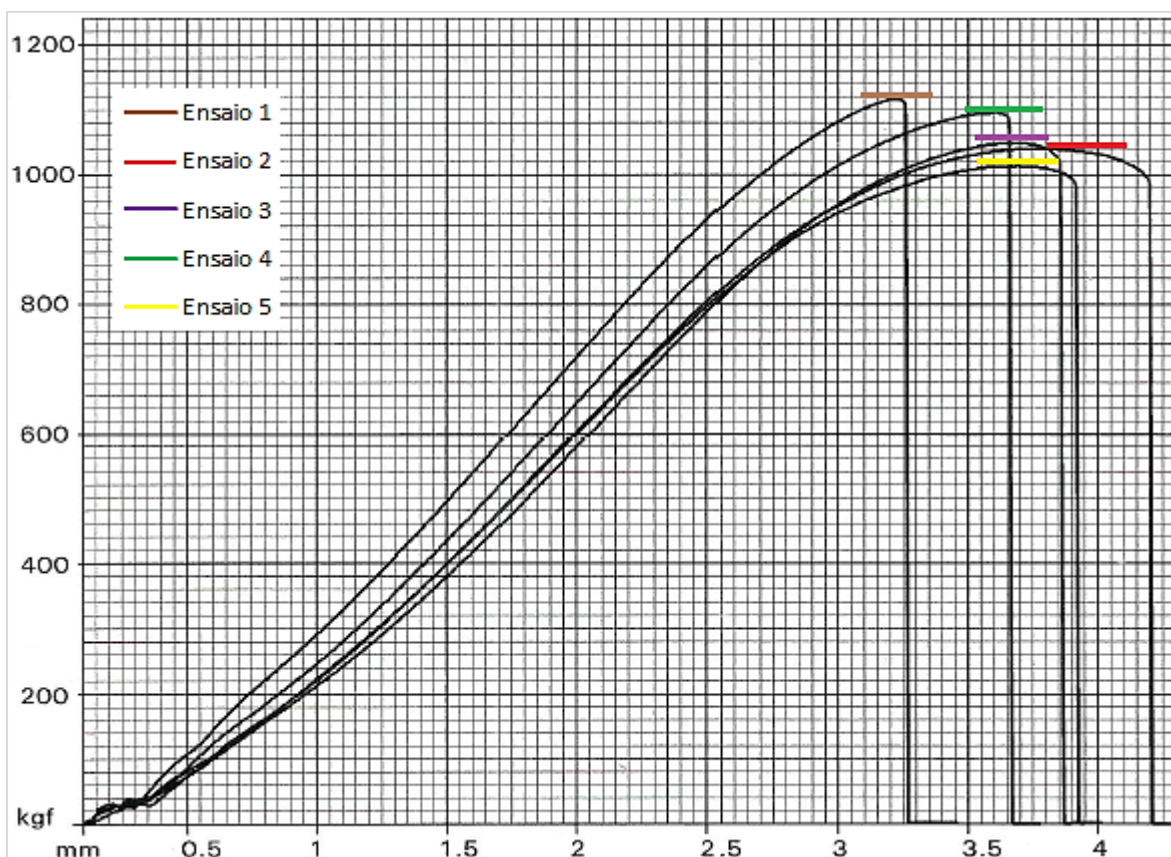


Figura 4.26 - Resultados das forças obtidas nos ensaios após modificação da superfície do aço.

A Figura 4.27 mostra as curvas tensão/deformação relativas aos ensaios realizados nos novos provetes (composto bimetálico-2), apresentam valores de tensão significativamente superiores aos valores obtidos anteriormente, nos ensaios realizados com provetes do composto bimetálico-1.

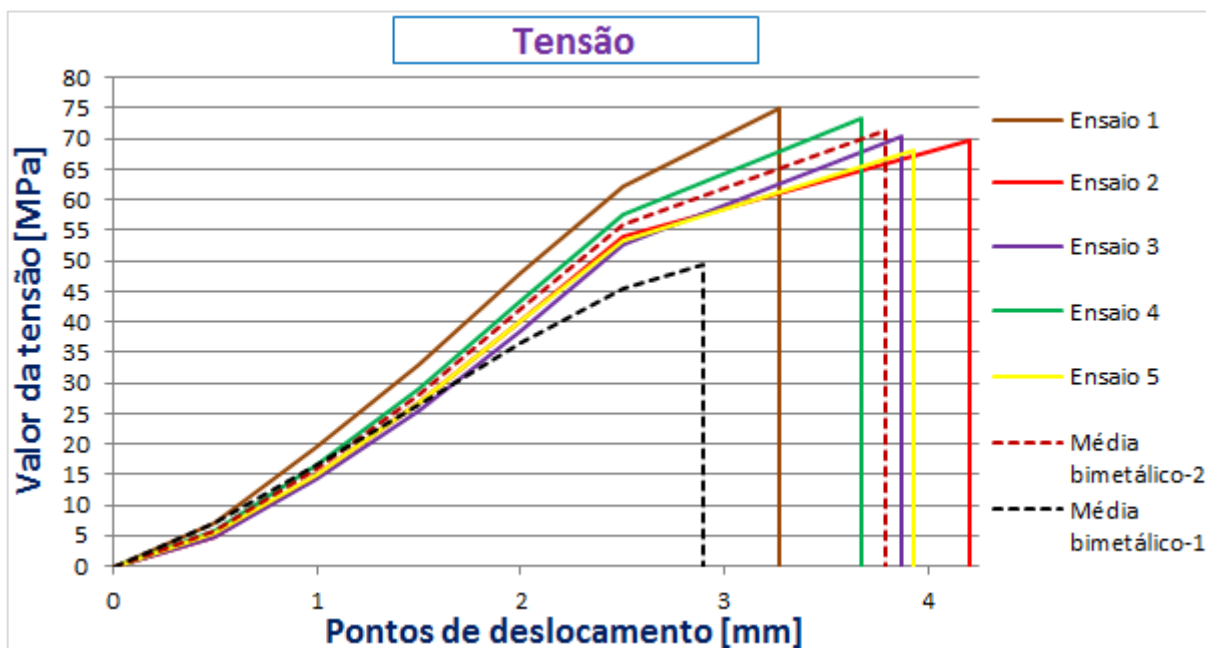


Figura 4.27 - Curvas tensão vs deslocamento no composto bimetálico-2.

Comparando a Tabela 4.6 com a Tabela 4.8 esclarece-se este facto de uma forma mais detalhada, onde o valor médio da tensão no ponto máximo sobe de 49,8 para 71,2 MPa, correspondendo a um aumento de 43%.

Tabela 4.8 - Valores das tensões após otimização.

	Tensão (MPa)					
	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	Máx.
Ensaio 1	7,211	19,451	33,039	48,076	62,275	74,880
Ensaio 2	4,819	14,786	26,607	40,310	53,834	69,796
Ensaio 3	4,929	14,235	25,336	38,679	52,791	70,356
Ensaio 4	5,703	16,486	28,953	43,339	57,456	73,449
Ensaio 5	5,444	14,919	26,603	40,091	53,333	67,965
Média	5,621	15,975	28,108	42,099	55,938	71,289

Ao comparar os provetes tracionados anteriormente com os atuais, verifica-se uma alteração na zona de fratura. Os provetes do composto bimetálico-1 (Figura 4.28-a) mostram que a zona de fratura se localiza na interface, ou seja na zona da adesão, originando uma separação total entre o metal Babbitt e o aço. Já a Figura 4.28-b mostra que a zona de fratura do composto bimetálico-2 se situa no metal Babbitt e não na zona de adesão. Ou seja, romperam pelo material de menor resistência mecânica, que neste caso é o metal Babbitt.

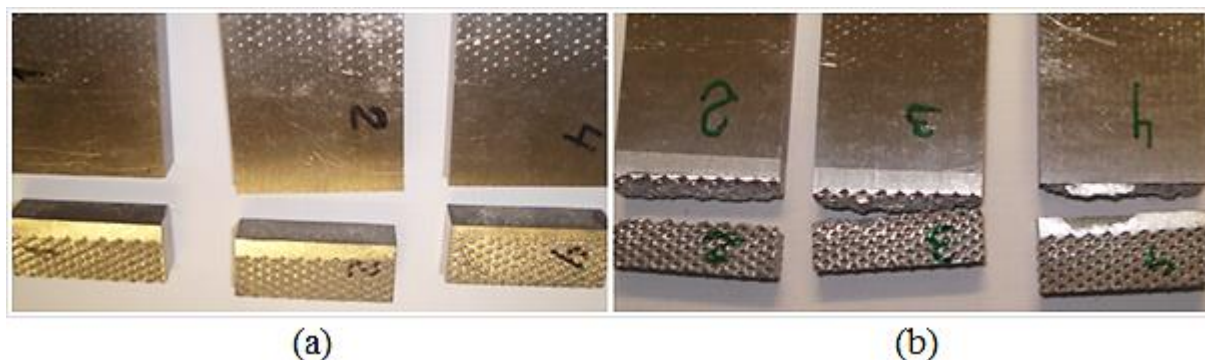


Figura 4.28 - Zonas de fratura após ensaios de tração (a) referentes às primeiras condições de deposição (b) referentes às segundas condições de deposição.

Com a rotura dos provetes fora da interface de ligação, evidencia-se a existência duma excelente adesão entre o revestimento e o substrato, evidenciando que a ligação de ambos os materiais que formam o composto bimetálico-2 supera a tensão de rutura do próprio metal Babbitt Tego V738.

#### 4.8.1.1. Ensaios de tração em provetes de Babbitt

De modo a conhecer a tensão de rutura do metal Babbitt Tego V738, efetuaram-se ensaios de tração a provetes formados exclusivamente por metal Babbitt. Devido à configuração destes provetes, optou-se por realizar os ensaios na máquina de tração Instron®, modelo 5584 (proporciona melhor tecnologia, Figura 3.12, seção 3.6 no capítulo 3).

Como se pode observar na Figura 4.29, os valores máximos das tensões registados são cerca de 72MPa, significando que a tensão de rutura do Babbitt Tego V738 se aproxima dos valores para os quais o composto bimetálico-2 atingiu a rotura (ver valores máximos da Tabela 4.8).

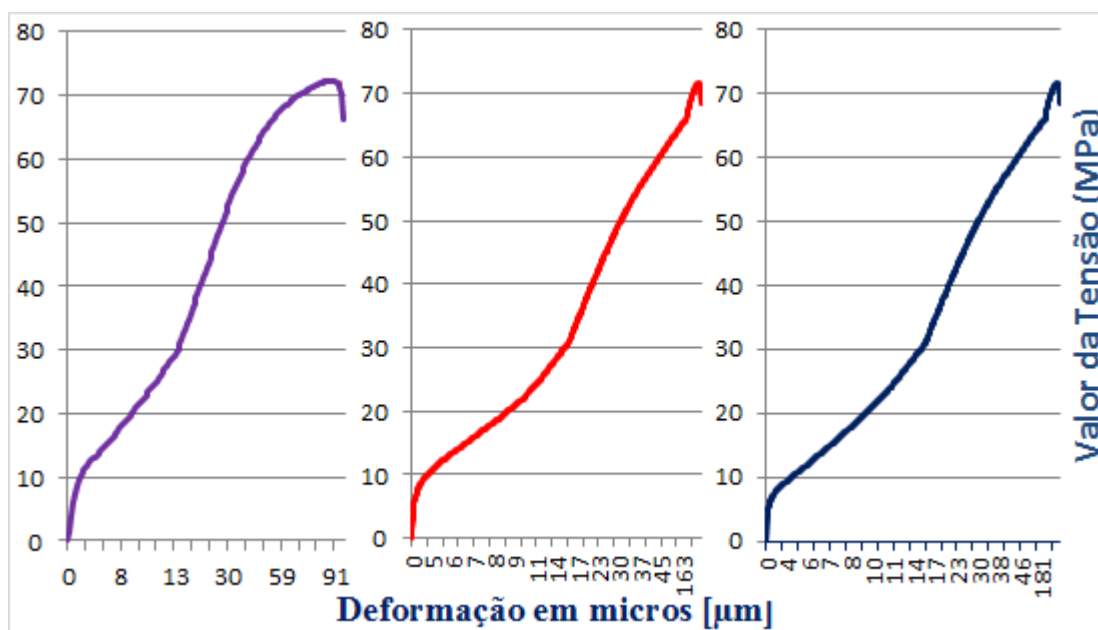


Figura 4.29 - Curvas tensão/deformação registados nos 3 provetes de metal Babbitt.



Por isso, como a rutura do composto bimetálico-2 ocorre no Babbitt e não na interface, conclui-se que a sua adesão apresenta uma tensão de rutura próxima da tensão do metal de menor resistência mecânica. Desta forma, conclui-se que a técnica utilizada para tratar a superfície do aço de forma a incrementar a adesão do metal Babbitt, foi bem-sucedida.

#### 4.8.2. Análise da microestrutura

Embora as técnicas propostas para otimizar a adesão contenham aspetos relevantes para o seu sucesso, talvez não sejam as únicas que contribuíram para o aumento significativo da adesão. De facto, a alteração da dureza no substrato junto da interface, a microestrutura e a rugosidade, poderão também contribuir para a adesão de ambos materiais.

##### 4.8.2.1. Composição química do composto bimetálico-2

Para garantir que o composto bimetálico-2 não sofreu qualquer alteração na composição química relativamente ao composto bimetálico-1, houve necessidade de se efetuar uma nova análise por MEV. Assim pode verificar-se que os elementos de cada liga se mantêm, rejeitando qualquer suspeita sobre a sua influência na adesão.

Comparando os resultados obtidos no composto bimetálico-2 (Tabela 4.9) com os valores obtidos no composto bimetálico-1 (Tabela 4.1) verifica-se que o material do substrato-2 é idêntico ao do substrato-1.

Tabela 4.9 - Composição química do substrato-2 – Aço St 52 – MEV.

Elementos	Percentagem em peso	Percentagem atómica
Ferro	98,62	98,18
Silício	0,43	0,86
Manganésio	0,95	0,96
Total	100	100

Quanto ao metal Babbitt, existiu uma pequena variação na sua composição, diminuiu a percentagem de estanho (de 82,81 para 80,07%) e aumentaram as percentagens de chumbo (de 0,36 para 1,6%) e cobre (de 4,04 para 5,27%), os restantes elementos químicos mantiveram-se praticamente inalterados (comparar Tabela 4.2 com a Tabela 4.10).

É importante realçar que a análise de EDS é uma análise semi-quantitativa, por isso, podem ocorrer desvios relativos à composição original.

Tabela 4.10 - Composição química do revestimento-2 – Metal Babbitt – MEV.

Elementos	Percentagem em peso	Percentagem atômica
Estanho	80,07	77,09
Antimônio	11,69	10,97
Cobre	5,27	9,48
Cádmio	1,02	1,04
Chumbo	1,6	0,88
Arsênio	0,36	0,54
Ferro	0	0
Total	100	100

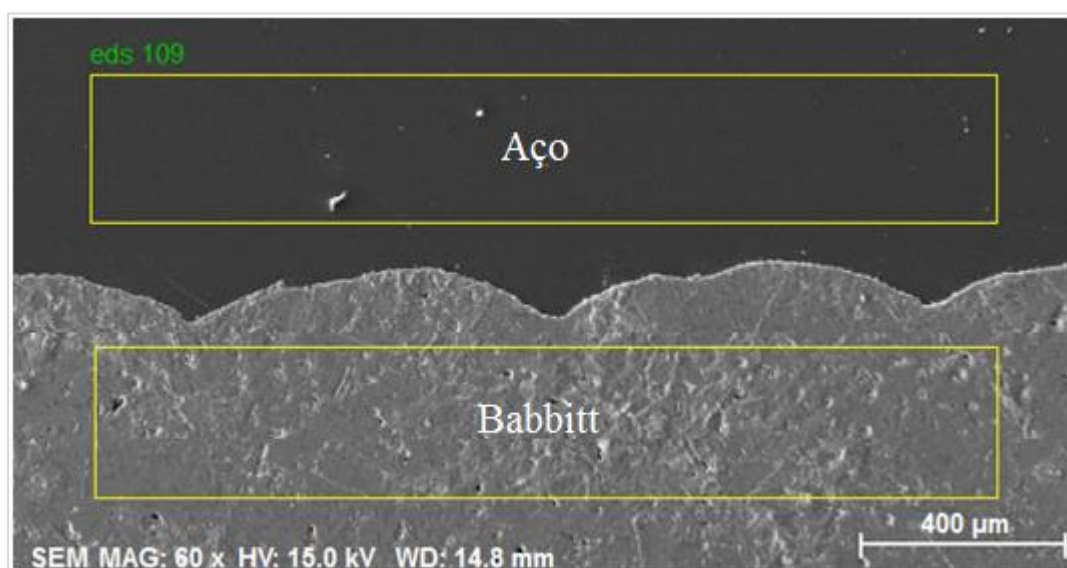


Figura 4.30 - Contornos a amarelo identificam a zona de análise química.

#### 4.8.2.2. Microestrutura do composto bimetalico-2 – Aço/Babbitt

Como se verificou, a composição química do aço que compõe o substrato do composto bimetalico-2, não sofreu grande alteração em relação ao substrato do composto bimetalico-1. Porém, analisando a sua microestrutura pode ver-se que esta apresenta uma distribuição das fases diferente (comparar Figura 4.8 com Figura 4.31). Nomeadamente, no que diz respeito à distribuição da perlite – as chapas de aço sujeitas a laminação a quente poderão apresentar na sua estrutura bandas de perlite alternadas com ferrite, enquanto no segundo caso a distribuição da ferrite e perlite é homogênea.

No que diz respeito ao metal Babbitt, este mantém a sua estrutura original. Observa-se uma matriz sólida rica em estanho com cuboides de SbSn e agulhas de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  – os cuboides de SbSn normalmente aparecem com algum chumbo à mistura, devido a solubilidade do antimônio na solução sólida rica em estanho diminuir com a presença do chumbo. Já as agulhas de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  não sofrem qualquer alteração com a presença de chumbo (ASM 2004).

Comparando a Figura 4.7 com a Figura 4.31, observa-se que os cuboides de SbSn aumentaram de tamanho.

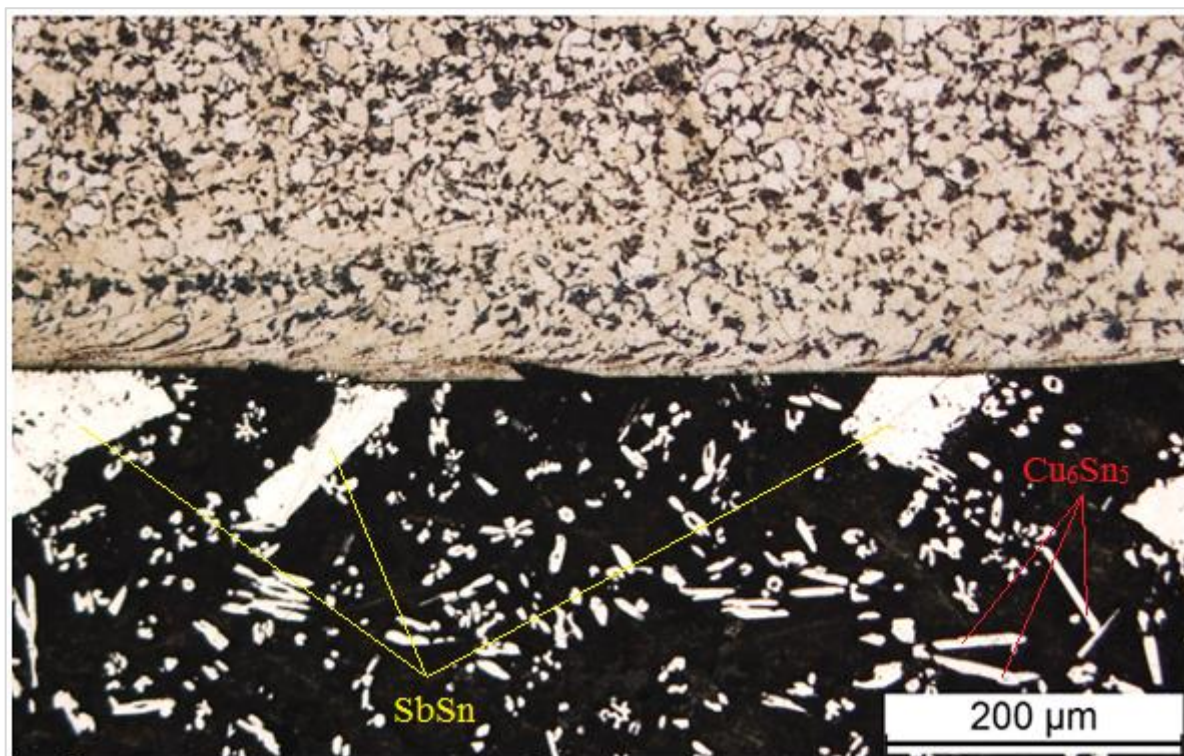


Figura 4.31 - Microestrutura do composto bimetalico-2 – Aço/Babbitt.

#### 4.8.2.3. Perfil e microestrutura junto da interface

Um aspeto fundamental a reter da Figura 4.32 (interface pertencente ao composto bimetalico-2), em relação à Figura 4.9 (interface pertencente ao composto bimetalico-1), diz respeito ao perfil que a interface-2 apresenta. Verifica-se que contém várias reentrâncias na superfície, que devido à sua forma tombada (tipo “ganzepe”) pode intervir no aumento da adesão do revestimento.

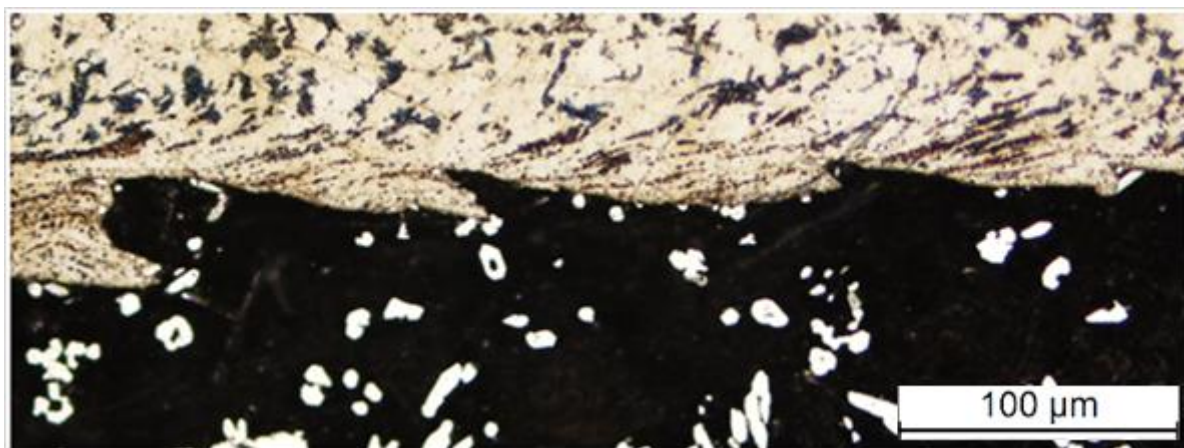


Figura 4.32 - Microestrutura junto da interface-2 com reentrâncias.



Quanto à rugosidade, esta apresenta valores mais baixos, com altura das asperezas perto dos 100  $\mu\text{m}$  (Figura 4.33).

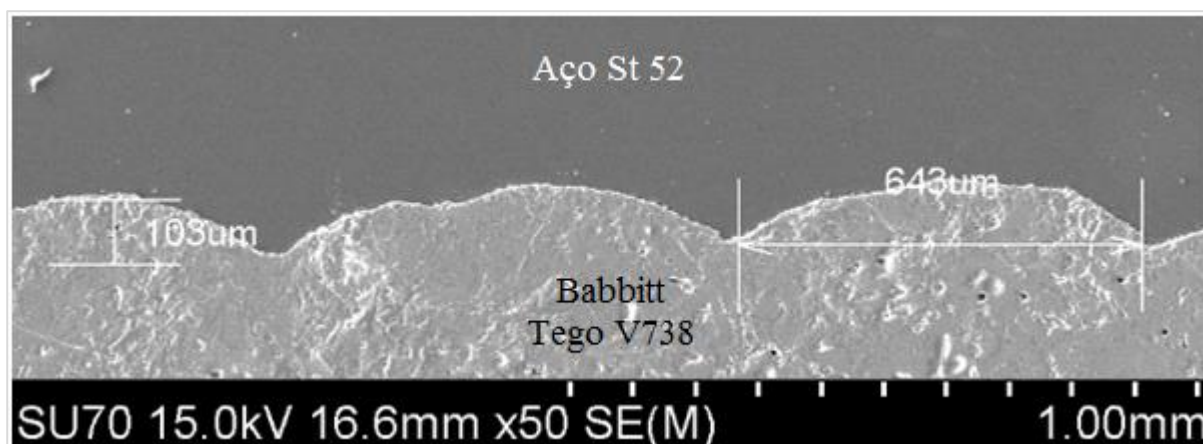


Figura 4.33 - Altura e comprimento das asperezas no composto bimetálico-2.

Pelo comprimento das asperezas prevê-se que o avanço, ou o raio da ferramenta de corte, foi mais elevado na preparação da superfície do aço utilizado no composto bimetálico-2.

É importante salientar que a Figura 4.33 mostra a face paralela ao avanço da ferramenta de corte, tal como se exemplifica na Figura 4.34. Por esse motivo, é possível identificar os vales e as asperezas que originam a rugosidade na superfície do composto.

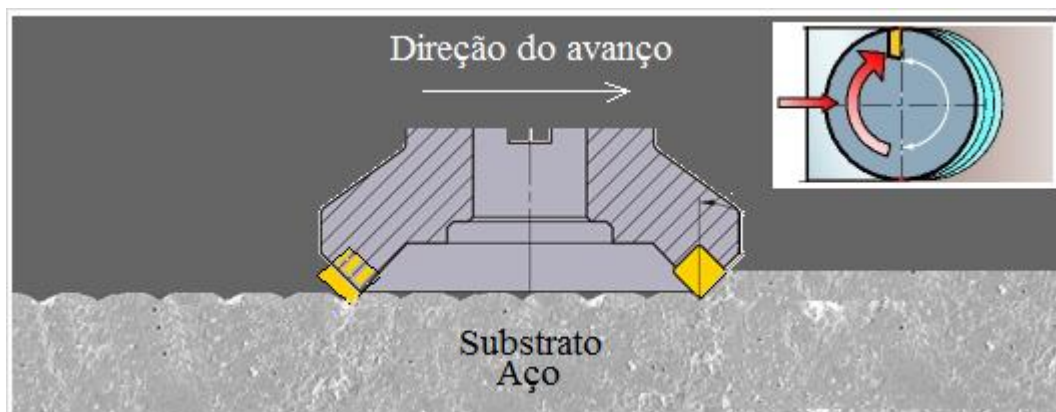


Figura 4.34 - Exemplo de uma roca a desbastar o substrato e morfologia obtida na superfície.

Já a Figura 4.31 e Figura 4.32 mostram a face perpendicular à representada na Figura 4.34, a qual evidencia uma superfície lisa com reentrâncias, cuja origem se prevê estar relacionada com o processo de granalhagem e com a orientação do jacto de abrasivo sobre a superfície do aço.

No que diz respeito à adesão, este fenómeno é efetivamente uma mais-valia, nomeadamente na melhoria da adesão, devido o metal Babbitt se entrelaçar nas cavidades deixadas pelas referidas reentrâncias.

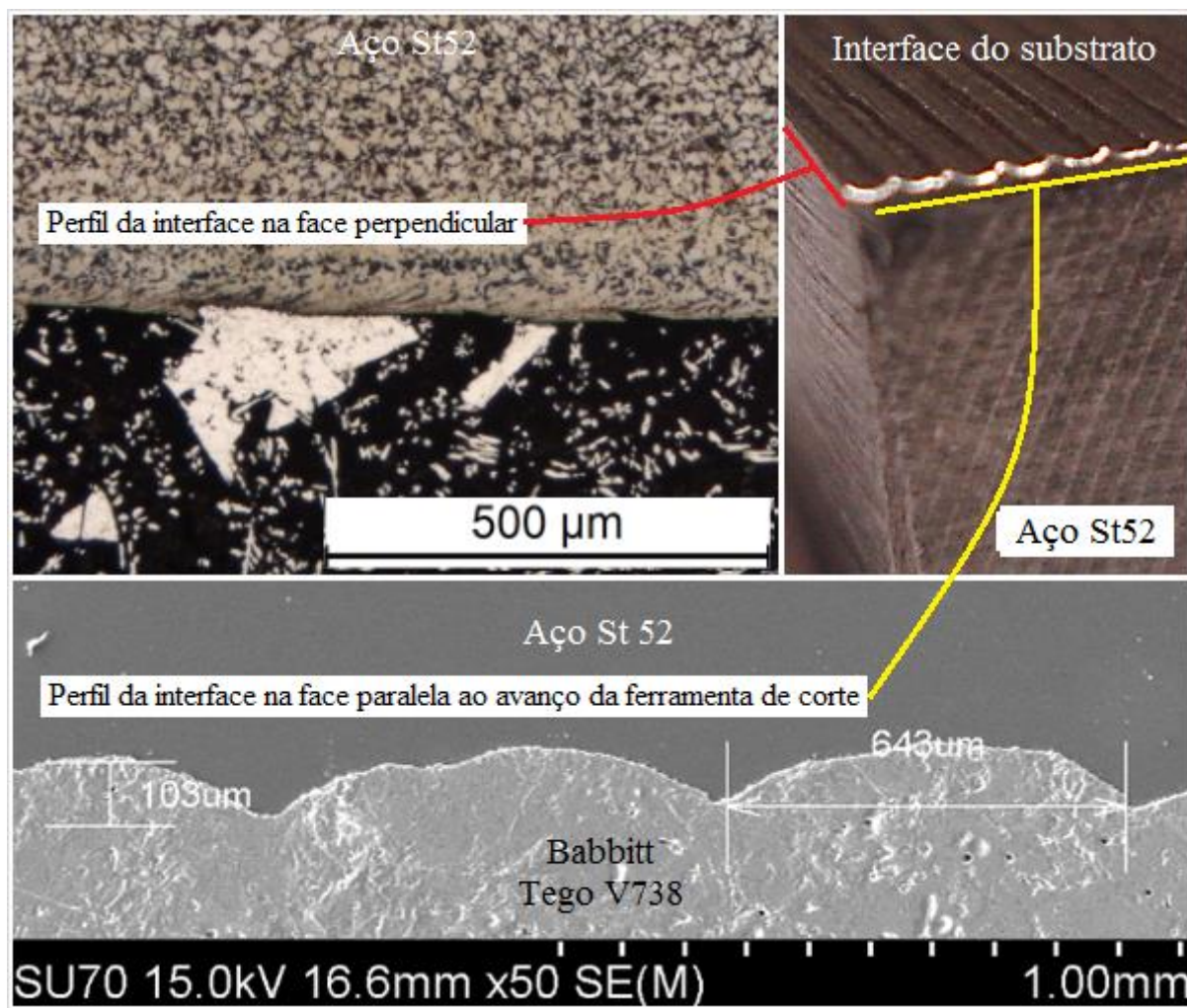


Figura 4.35 - Perfil de rugosidade na interface-2.

A rugosidade observada na MEV (altura das asperezas, pertencente ao composto bimetálico-2 – Figura 4.33) foi comparada com os valores obtidos com um rugosímetro. Como se pode ver na Tabela 4.11, a média da rugosidade  $R_z$  é semelhante aos valores observados em MEV.

Tabela 4.11 - Valores da rugosidade em 5 pontos do substrato-2.

Provete	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
1	23	94,15	28,25
2	24,65	98,5	29,87
3	21,76	89,19	26,68
4	23,1	92,3	27,7
5	24,65	95,9	29,35
Média	23,432	94,008	28,37

Contudo, é importante chamar à atenção que a rugosidade do composto bimetálico-2 (comparado com o composto bimetálico-1) apresenta valores inferiores, significando que o aumento da rugosidade na superfície do substrato não garante o aumento da adesão.



#### 4.8.3. Fatores que influenciam a adesão no composto-2

Conforme mencionado anteriormente, os intermetálicos não fazem parte integrante da ligação de ambos materiais, tal como pode ser confirmado pela presente ilustração (Figura 4.36, composto bimetálico-2).

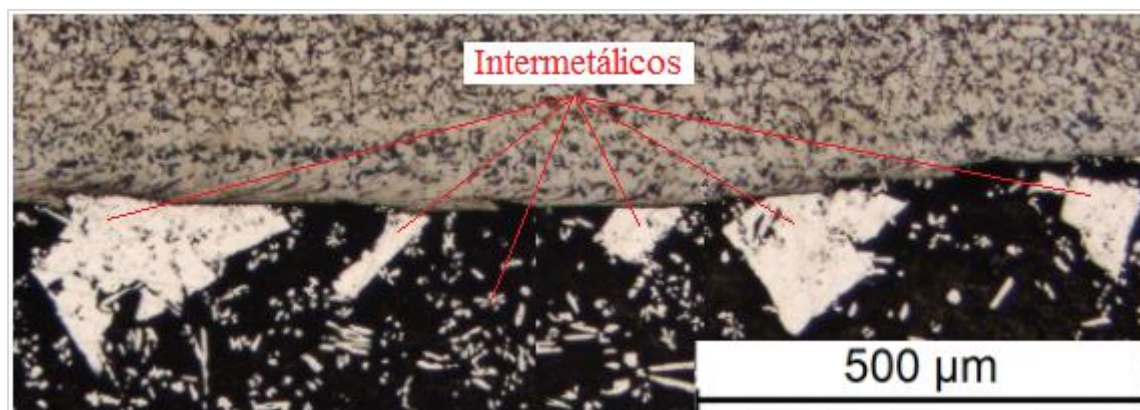


Figura 4.36 - Intermetálicos de SbSn e  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  na interface-2.

Como se pode ver na Figura 4.37, observa-se uma interface que separa os dois materiais, aço e metal Babbitt, sendo a ligação do metal Babbitt com o aço protagonizada pela ferrite e pela matriz de estanho.

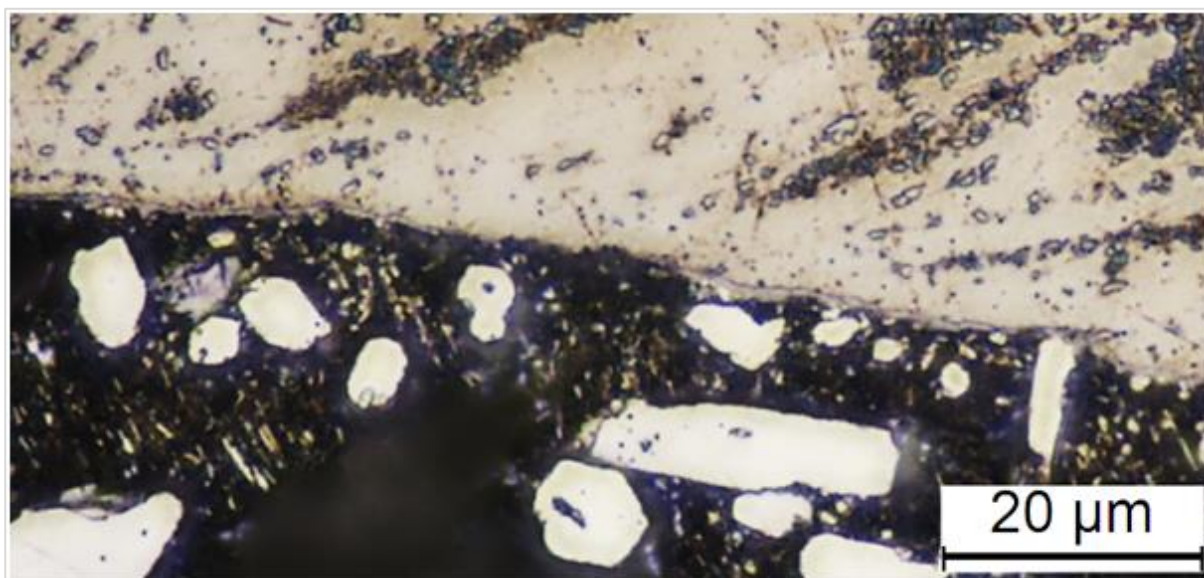


Figura 4.37 - Pormenor da interface no composto bimetálico-2.

Outro fenómeno a salientar, é a dificuldade de identificar os contornos dos grãos da ferrite perto da fronteira do aço com o metal Babbitt. Quanto à desintegração da perlite reduzindo-se em pequeníssimas partículas espalhadas pela ferrite, também evidencia algo de importante, pois esta deixa que a ferrite predomine ocupando maior espaço nesta zona (Figura 4.37 e Figura 4.38).

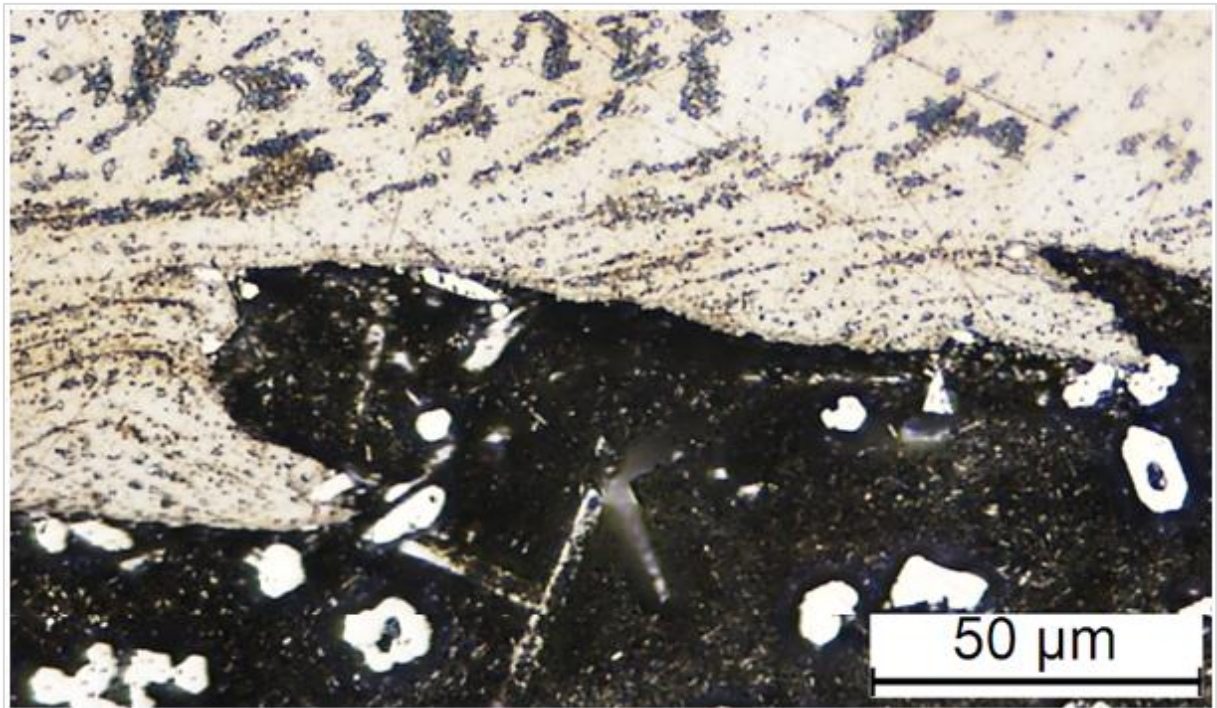


Figura 4.38 - Distorção dos grãos e aspeto da perlite junto da interface-2.

A Figura 4.39-a permite identificar uma elevada perfeição na junção das duas ligas, destacando a interface que apresenta uma linha perfeita sem qualquer irregularidade, livre de porosidade e falta de adesão. O mapa de distribuição dos elementos obtido por EDS apresentado na Figura 4.39-b evidencia que não existe uma difusão atômica na interface a longa distancia.

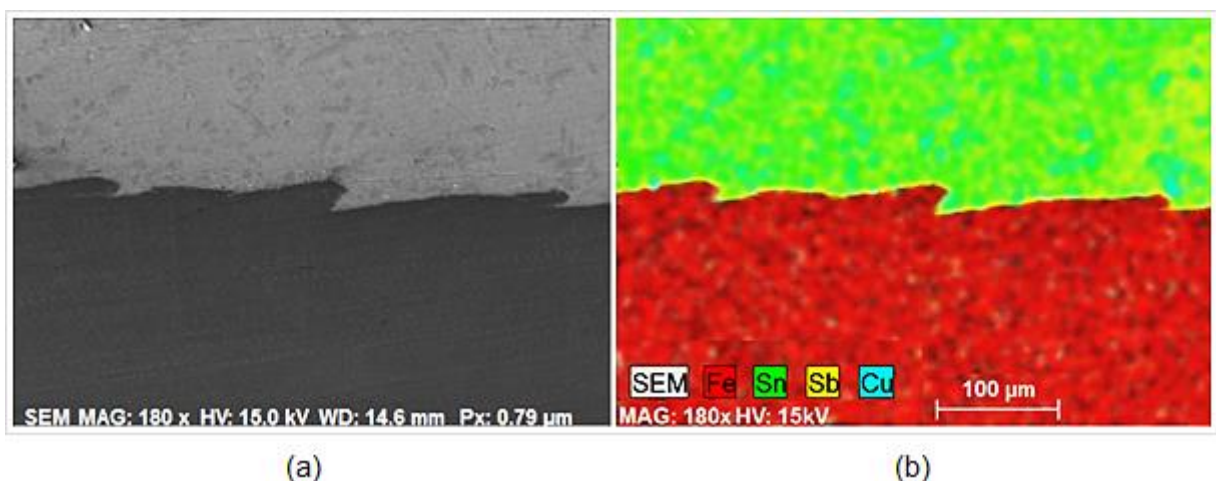


Figura 4.39 - MEV e respetivo mapa de distribuição de EDS para o aço com o Babbitt.

#### 4.8.3.1. Outros aspetos fundamentais a reter na adesão dos materiais

A Tabela 4.12 ilustra as propriedades físicas e atômicas dos principais elementos que constituem o composto bimetálico (Aço/Babbitt), que como se sabe, são as que intervêm diretamente no mecanismo de adesão.



Tabela 4.12 - Comparação entre os principais elementos que compõem o composto.

Nome	Símbolo	Número	Atômico	Covalente	Ponto	Dureza	Estrutura
Material	Químico	Atômico	Raio [pm]	Raio [pm]	Fusão [°C]	[HB]	Cristalina
Estanho	Sn	50	140	139	231,9	7	Tetragonal
Antimônio	Sb	51	140	139	630,8	50	Romboédrico
Cobre	Cu	29	128	132	1085	80	C F C
Chumbo	Pb	82	154	147	327,5	5	C F C
Cádmio	Cd	48	151	144	321,1	20	Hexagonal
Ferro	Fe	26	140	125	1536	95	C C C

Ao se analisar o diagrama de fases binário Fe-Sn (Figura 4.16) conclui-se que próximo da temperatura ambiente existe baixa solubilidade do Fe no Sn e do Sn no Fe. No entanto, observa-se que perto da temperatura de 231,9°C o Sn ao fundir dissolve uma quantidade reduzida de Fe. Este facto pode justificar a razão de se aquecer o substrato de aço antes da deposição do metal Babbitt líquido, já que este facilita a difusão do estanho com o ferro.

Quanto à existência de compostos  $\text{FeSn}_2$  na interface entre o aço e o Babbitt, neste trabalho não foram utilizadas técnicas experimentais que permitam identificar a formação de compostos com elementos químicos provenientes do substrato e do revestimento. Contudo, com base no diagrama de equilíbrio Fe-Sn sabe-se que tende-se a formar compostos com elementos de Fe e Sn, podendo este facto conter um grande impacto na adesão de ambos materiais.

Stachowiak e Batchelor (Stachowiak e Batchelor 2000) referem que a tendência para dois metais aderirem não abdica da solubilidade mútua entre eles ou do tamanho relativo dos seus átomos, por isso, existir uma grande afinidade no ferro com ferro. Como se comprova na Tabela 4.12 o ferro e o estanho contêm raio atómico igual, explicando mais uma vez o porquê da adesão do composto bimetálico ser protagonizada essencialmente por estes elementos.

As estruturas cristalinas também influenciam a adesão dos metais, verifica-se, através de experiências realizadas, que a hexagonal compacta tem um coeficiente médio de adesão menor que as outras três principais (Tetragonal, Cubica de Corpo Centrada e Cubica de Faces Centrada) (Stachowiak e Batchelor 2000).

A dureza dos materiais é outro parâmetro que interfere no mecanismo de adesão, pois materiais com durezas mais elevadas contêm coeficientes de adesão mais baixos (Stachowiak e Batchelor 2000). Recordar-se que a Figura 2.25 apresentada no capítulo 2 mostra que entre os materiais com a mesma estrutura cristalina, os que apresentam maior capacidade de adesão são os de menor dureza.

Não obstante, pode dizer-se que os substratos de maior dureza, como é o caso do aço com elevado teor de carbono ou o ferro fundido que contém grafite, apresentam menor eficácia no mecanismo de adesão.



A maior percentagem de chumbo que o novo composto inclui, pode também contribuir para a melhor adesão do bimetálico-2, devido ao seu excelente coeficiente de adesão (Stachowiak e Batchelor 2000).

#### 4.8.4. Dureza no composto bimetálico-2

Como referido anteriormente, a dureza dos materiais tem um enorme peso no mecanismo de adesão. Para se relacionar esta teoria com a melhoria da adesão obtida, houve necessidade de se efetuar vários ensaios de dureza nas imediações da interface.

A Figura 4.40 retrata o perfil de dureza do aço e do Babbitt quando se aproxima da interface. Verifica-se que não existe grande oscilação na dureza do metal Babbitt com a variação da distância à interface. Já o substrato de aço apresenta um aumento significativo de dureza quando se aproxima da interface.

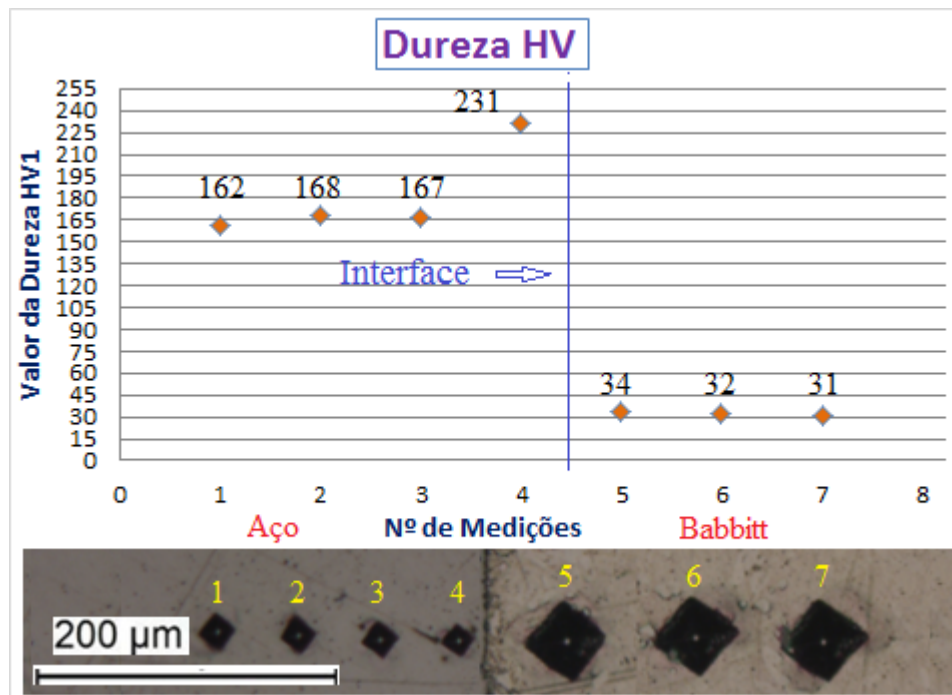


Figura 4.40 - Dureza do composto bimetálico-2 junto da interface com carga de 50g.

Comparando os valores de dureza junto da interface para o composto bimetálico-1 e composto bimetálico-2 (Figura 4.40 e Figura 4.41), verifica-se que existem diferenças significativas entre eles. Nomeadamente, os valores de dureza no substrato-2 apresentam um perfil de dureza mais constante até muito perto da interface, aumentando apenas no ponto 4.

Já o substrato-1 apresenta um aumento de dureza em todos os pontos, à medida que se efetua a medição a menor distância da interface. Verifica-se que a medição nº 4 do substrato-1 comparada com o nº 4 do substrato-2, revela um aumento de dureza perto dos 30%.

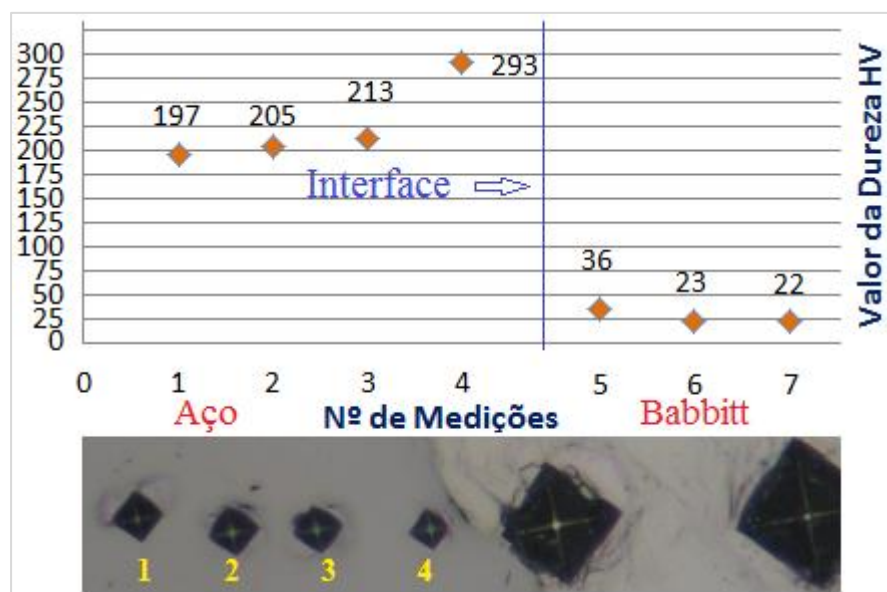


Figura 4.41 - Dureza do composto bimetálico-1 junto da interface com carga de 50g.

Com estes dados conclui-se que o substrato-2 comporta, na área envolvente da interface, uma dureza bastante inferior, que poderá estar relacionada com o tipo de microestrutura do aço, que parece ser mais rica em ferrite. Assim, é de realçar que a diminuição da dureza influencia pela positiva a adesão.

#### 4.9. Comparação entre bimetálico-1 e bimetálico-2

De modo a facilitar a compreensão dos fatores que contribuíram para o aumento da adesão no composto bimetálico-2, é apresentada em seguida uma comparação dos resultados obtidos nos dois compostos bimetálicos produzidos.

##### 4.9.1. Perfil das interfaces

A Figura 4.42-a mostra o perfil de rugosidade do aço do composto bimetálico-1. Porque a ferramenta de corte inicia o arranque da apara pela face (x), percorrendo a superfície até à face (y) (ou vice-versa). Este facto permite obter um perfil de rugosidade semelhante em ambas as faces, como ilustra a Figura 4.43 e Figura 4.44.

Já a Figura 4.42-b mostra o perfil de rugosidade do aço do composto bimetálico-2. Neste caso a ferramenta de corte inicia o arranque da apara pela face (y), percorrendo a superfície do substrato até à face oposta (ou vice-versa). Por este motivo, o perfil de rugosidade da face (x) e da face (y) é significativamente diferente. Ou seja, a face (y) apresenta um perfil de rugosidade semelhante à observada no aço do composto bimetálico-1, enquanto a face (x) apresenta pequenas reentrâncias (Figura 4.45 e Figura 4.46).

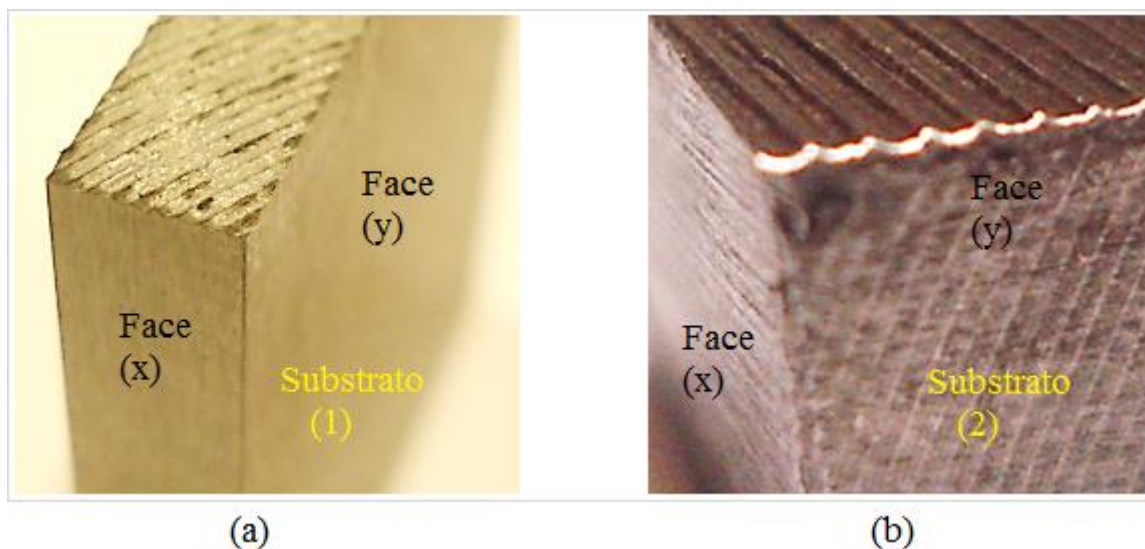


Figura 4.42 - (a) Perfil da interface-1 e (b) Perfil da interface-2.

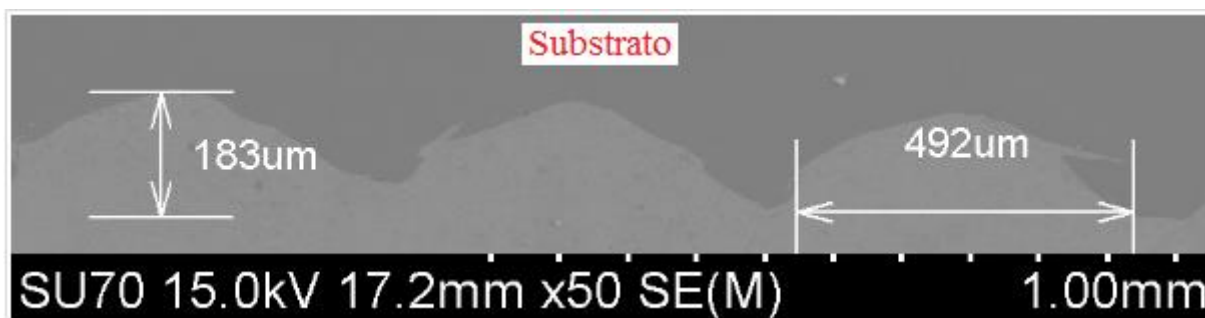


Figura 4.43 - Perfil de rugosidade na face (x) da interface-1.

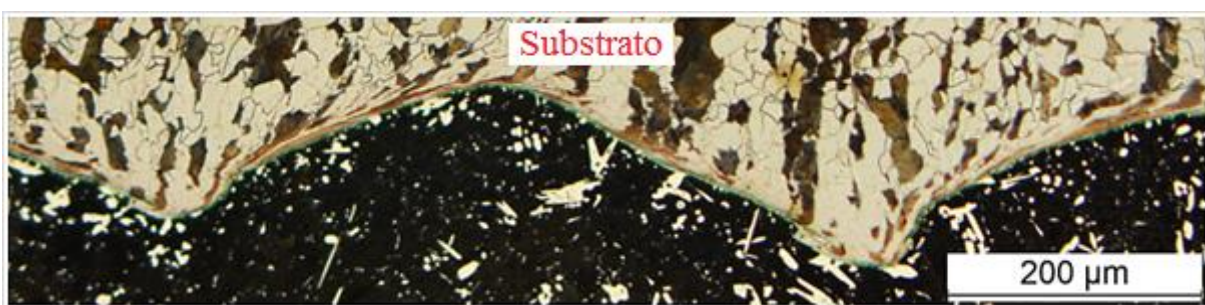


Figura 4.44 - Perfil de rugosidade na face (y) da interface-1.

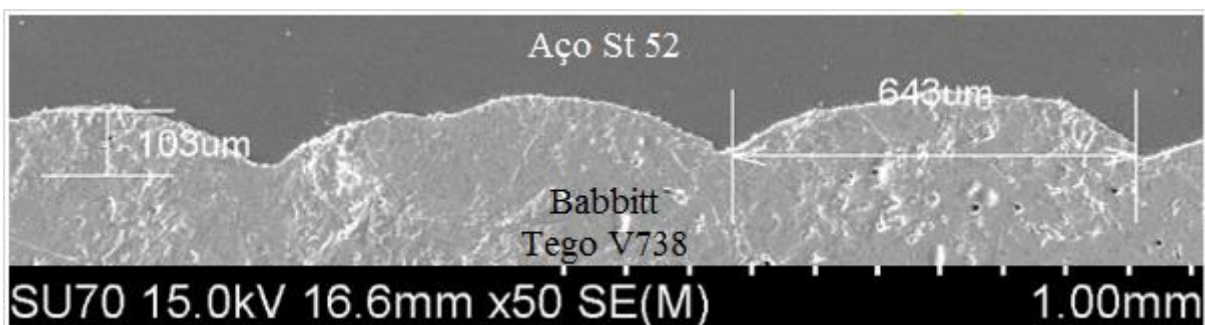


Figura 4.45 - Perfil de rugosidade na face (y) da interface-2.



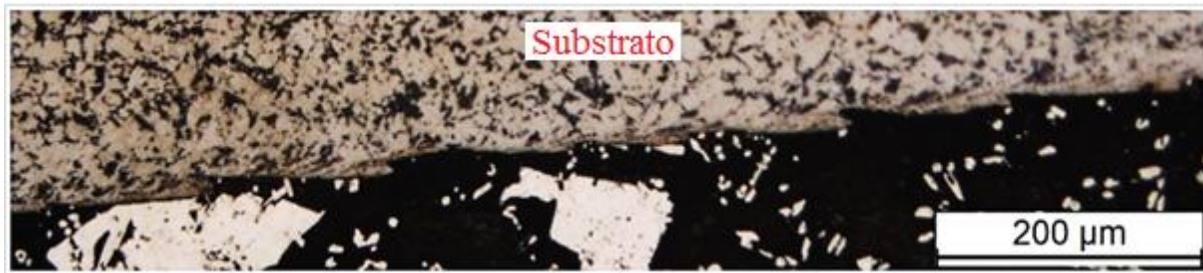


Figura 4.46 - Perfil de rugosidade na face (x) da interface-2.

#### 4.9.2. Microestrutura dos substratos

Na Figura 4.47 e Figura 4.48 apresentam-se as microestruturas dos dois tipos de interface analisados. As diferenças em termos de morfologia das fases são evidentes como relatado anteriormente.

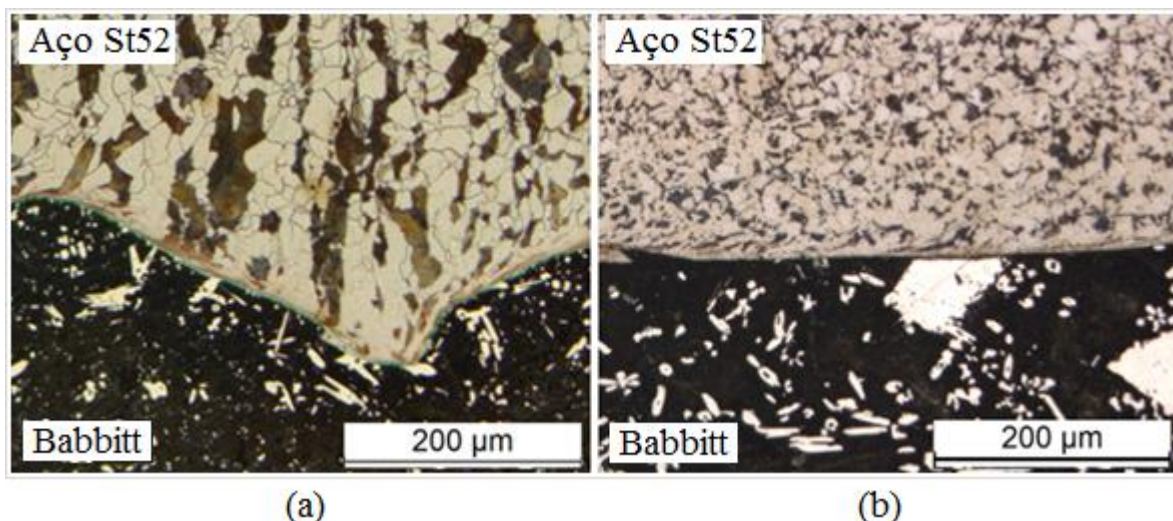


Figura 4.47 - (a) Microestrutura do composto bimetálico-1 e (b) Microestrutura do composto bimetálico-2.

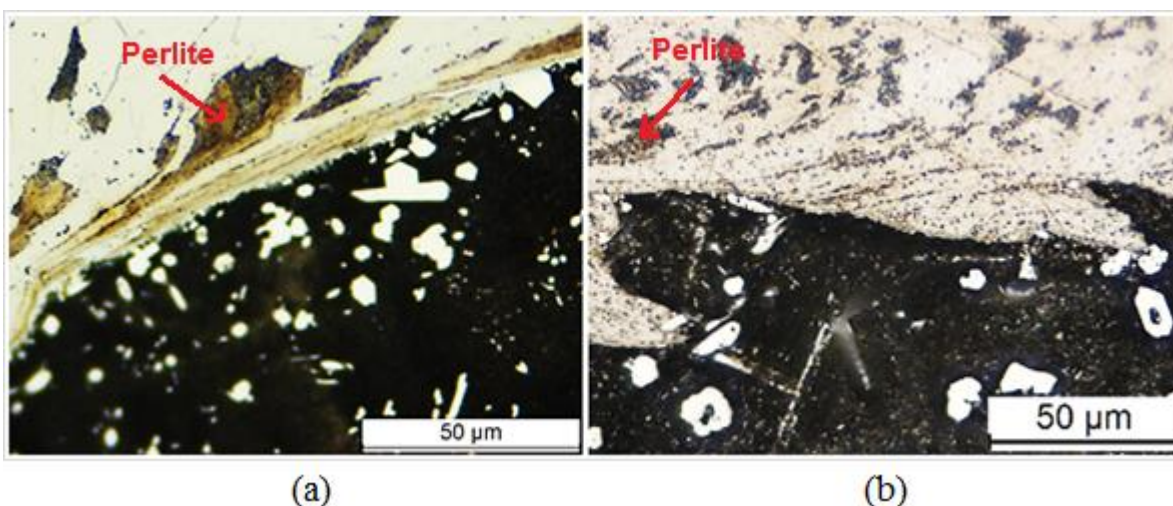


Figura 4.48 - (a) Perlite do composto bimetálico-1 e (b) Perlite do composto bimetálico-2.

#### 4.9.3. Dureza junto da interface

A Figura 4.49 mostra que o aumento da dureza na interface do composto bimetálico-2 é menor que no composto bimetálico-1.

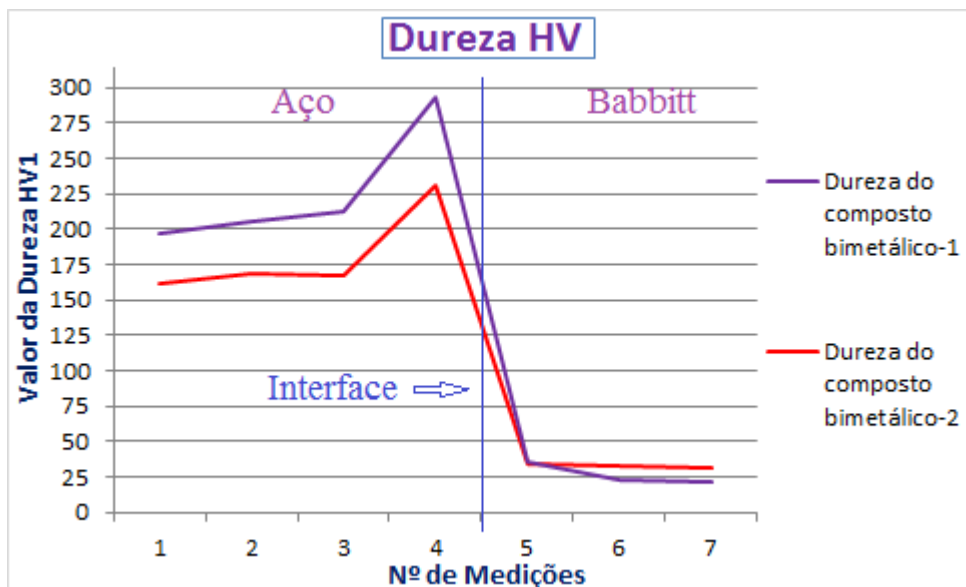


Figura 4.49 - Dureza junto da interface com carga de 50g.

#### 4.9.4. Tensão de rotura

A Figura 4.50 mostra a tensão necessária para separar o revestimento do substrato. O composto bimetálico-2 apresenta um aumento médio de 43%.

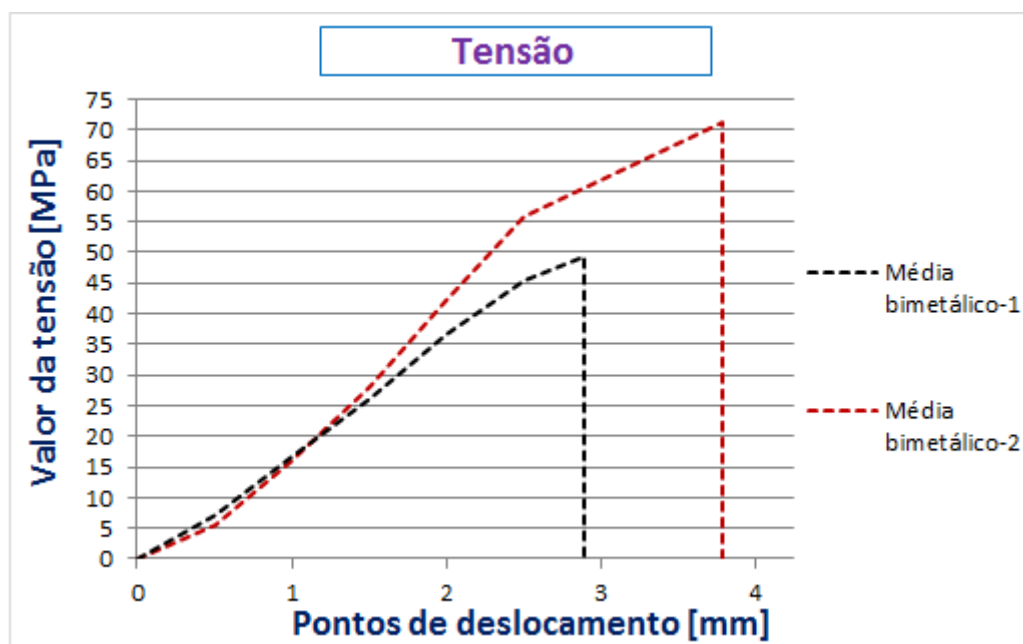


Figura 4.50 - Curvas de tensão nominal vs deslocamento.



## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusão

A aplicação de um tratamento de modificação da superfície do substrato (aço) revelou-se um método eficaz para melhorar a adesão do metal Babbitt ao substrato. Desta forma, a preparação das superfícies a revestir é um processo crucial, podendo ser dividido em duas etapas; Preparação mecânica da superfície e tratamento químico para reativar e remover eficazmente qualquer contaminante ou gordura depositada sobre as mesmas. No caso deste trabalho, numa primeira fase, foi avaliada a adesão e caracterizada a interface de um composto bimetálico utilizado correntemente em aplicações industriais, produzido segundo o método utilizado na empresa Cruz e Cruz. Posteriormente, foi modificado o processo mecânico de preparação da superfície do substrato, utilizando adicionalmente neste caso o processo de granalhagem, sendo produzido um novo composto bimetálico. Após os ensaios realizados nos dois compostos bimetálicos, comprova-se que o valor da tensão para separar o revestimento do substrato aumentou significativamente, correspondendo a um aumento de 43% no composto bimetálico-2. Verificou-se que o composto bimetálico-1 fraturou na zona da interface, originando uma separação total entre o Babbitt e o aço, enquanto o composto bimetálico-2 rompeu pelo metal Babbitt, significando que a adesão do composto bimetálico-2 atingiu a tensão de rotura do próprio metal Babbitt.

Conclui-se que o aumento da adesão do composto bimetálico-1 para o composto bimetálico-2 deve-se em grande parte ao efeito da ligação mecânica oriunda da existência das reentrâncias criadas na superfície do substrato. Contudo, existiram outros fatores que contribuíram para o sucesso obtido, tais como:

- Diminuição da rugosidade no substrato;
- Diminuição da dureza junto da interface;
- Predominância de fases ricas em ferro junto da interface;
- Fina dispersão da perlite no seio da matriz de ferrite.

Quanto à essência da adesão, comprova-se que resulta da difusão atômica entre o estanho e a ferrite e da morfologia superficial do substrato, revelando consequencialmente que os substratos devam apresentar na sua microestrutura, principalmente junto da interface, a predominância de ferrite. O aumento da fase ferrítica na interface-2 permitiu um aumento da difusão entre o estanho e o ferro, contribuindo para o aumento da adesão. Este facto evidencia que um aço de baixo teor em carbono providencia um aumento da adesão, significando que os ferros fundidos não são bem-sucedidos no referido mecanismo.



## 5.2. Trabalhos futuros

Durante o desenrolar deste estudo surgiram ideias interessantes que poderão contribuir para melhor compreender e aumentar a adesão. Assim, propõe-se em trabalhos futuros estudar detalhadamente o efeito de outros fatores na adesão da interface. Nomeadamente:

- Reagentes químicos;
- Adesão a outro tipo de substrato: Aços de diferentes composições químicas e ferros fundidos;
- Adesão de outras classes de materiais antifricção (metal Babbitt de diferente grau);
- Realização de ensaios de adesão de acordo com o previsto na norma ISO 4386-2;
- Desenvolvimento de uma interface de transição entre o substrato e o revestimento, com diferente composição química;
- Utilização da técnica de SLM - Sintering Laser Melting para depositar uma interface sobre o substrato.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ABNT Catálogo. *Norma Técnica*. 2012. <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=20411> (acedido em Dezembro de 2013).
- Alhanati, Lucien Silvano. “Física.” *Alfaconnection*. s.d. [http://alfaconnection.net/pag\\_avsf/fqm0101.htm](http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0101.htm) (acedido em Janeiro de 2014).
- All-biz. *metal-babbit-blanco*. 2010-2014. <http://www.all.biz/es/metal-babbit-blanco-bgg1009903> (acedido em 26 de Abril de 2014).
- Alunos online. “Galvanoplastia.” *alunosonline*. 2011. <http://www.alunosonline.com.br/quimica/galvanoplastia.html> (acedido em Janeiro de 2014).
- Applied. “Coefficients of Friction.” *web.applied.com*. s.d. <http://web.applied.com/assets/attachments/492ACC9E-E5C2-2D43-0B8CCDA72ACE3361.pdf> (acedido em 22 de Fevereiro de 2014).
- Ashby M. *CES Edupack - Granta Design*. 2011.
- ASM. “Capítulo\_Metallography and Microstructures of Nonferrous Alloys\_Subcapítulo\_Metallography and Microstructures of Tin and Tin Alloys.” In *Volume 9, Metallography and Microstructures*, de ASM Handbook. United States of America: ASM International, 2004.
- ASM. “Capítulo\_Ternary Alloy Phase Diagrams\_Subcapítulo\_Cu (Copper) Ternary Alloy Phase Diagrams.” In *Volume 3, Alloy Phase Diagrams*, de ASM Handbook. United States of America: ASM International, 1992.
- ASM. “Capítulos\_Binary Phase Diagrams and Ternary Alloy Phase Diagrams.” In *Volume 3, Alloy Phase Diagrams*, de ASM Handbook. United States of America: ASM International, 1992.
- Barralis e Maeder. “Capítulo\_Ligas não ferrosas.” In *Prontuário de metalurgia Elaboração, Estruturas-propriedades e normalização*, de Fundação Calouste Gulbenkian-Jean Barralis e Gérard Maeder, 123-143. Paris: Nathan, 2005.
- Behr Iron & Metal. “Behr Iron & Metal Non-Ferrous.” *behrim*. s.d. <http://www.behrim.com/docs/default-document-library/babbittalloys.pdf> (acedido em Fevereiro de 2014).
- Callister e Rethwisch. “Capítulo\_Diffusion.” In *Fundamentals of materials science and engineering : an integrated approach-4th ed.*, de David G. Rethwisch William D. Callister, 170-184. John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- Chris, BR, Willis Thomas, e Maluniu. “How to Pour Babbitt Bearings.” *wikihow*. s.d. <http://www.wikihow.com/Pour-Babbitt-Bearings> (acedido em 16 de Fevereiro de 2014).
- Comyn, John. “Capítulo\_Theories of Adhesion.” In *Adhesives and sealants, General Knowledge, Application Techniques, Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 2*, de Philippe Cognard, 1-47. Versailles, France: Elsevier, 2006.
- Cruz & Cruz. *Fabrico e reparação de chumaceiras*. 1981. <http://www.cruzecruz.com/> (acedido em 08 de 12 de 2013).
- DeHart, A. O. “Capítulo\_Sliding Bearing Materials.” In *Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology, Volume II*, de E. Richard Booser, 463-475. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1983.

- DSE Bearing Co.,Ltd. *youtube*. Abril de 2011. <http://www.youtube.com/watch?v=rrmRJEhbFWo> (acedido em 17 de Fevereiro de 2014).
- Eutectic Castolin. "Aspersão Térmica." *Eutectic Castolin*. 2011. [http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo\\_aspersao\\_termica.pdf](http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo_aspersao_termica.pdf) (acedido em Janeiro de 2014).
- F. Ramada. "Catálogo - Aços Industriais." *Aços Industriais*. s.d. <http://www.ramada.pt/index.php?cat=45&eb=13> (acedido em 12 de Abril de 2014).
- Furtado, Lucas da Silva. "Alinhamento de máquinas rotativas." *ebah*. USJT. Maio de 2010. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAA6hwAL/alinhamento-maquinas-rotativas> (acedido em Dezembro de 2013).
- George, e Glacier. "Capítulo\_Materials for Friction and Wear Applications\_Subcapítulo\_Friction and Wear of Sliding Bearing Materials." In *Friction, Lubrication, and Wear Technology, Volume 18*, de ASM Handbook. United States of America: ASM International, 1992.
- Gingery, Vincent R. *How I Pour Babbitt Bearings*. 2001.
- Giorgini, Danielle Granha. "ppgem.eng.ufmg - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas." *Defesas - Otimização do processo de trefilação através da proposição de um modelo de previsão*. Fevereiro de 2013. <http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1791M.PDF> (acedido em 19 de Outubro de 2014).
- Glaeser, William. "Soft metals bearing materials." In *Materials for Tribology*, de William Glaeser, 69-77. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- GmbH, Metallwerk Langenau. "COUPOUND LIGAS." *Babbitt\_metal*. 2002-2010. [http://www.metallwerk.net/en/babbitt\\_metal.html](http://www.metallwerk.net/en/babbitt_metal.html) (acedido em 06 de Julho de 2014).
- Hitachi. *Hitachi High Technologies America*. 2014. <http://hitachi-hita.com/products/electron-microscopes-and-focused-ion-beam/field-emission-sem/su-70-uhr-schottky-analytical-> (acedido em 05 de Julho de 2014).
- Infomet. "Metais e ligas." *Infomet*. 1998. [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=12&cod\\_assunto=64](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=12&cod_assunto=64) (acedido em 29 de Junho de 2014).
- Infosolda. *Ensaio nao destrutivo - liquidos penetrantes*. 2013. <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/217-ensaio-nao-destrutivo-liquidos-penetrantes.html> (acedido em 12 de Janeiro de 2015).
- Júnior, César Luiz Canata. "Cobre e suas ligas." *eletrica*. s.d. <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/CesarCanata.pdf> (acedido em 12 de Junho de 2014).
- Padilha. "Capítulo\_Difusão no Estado Sólido." In *Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades*, de Angelo Fernando Padilha, 121-132. Curitiba Brasil: HEMUS LIVRARIA, 2000.
- Pike, Ron, e J.M. Conway. "Capítulo\_Friction and Wear of Components\_Subcapítulo\_Friction and Wear of Sliding Bearings." In *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, de ASM Handbook Volume18. United States of America: ASM INTERNATIONAL, 1992.
- Prodócimo, Kerly Eliz. "Modificação e Tratamento Superficial." In *Estudo da Modificação Superficial por Ataque Químico em Chapas de Aço Inoxidável AISI 430, visando à Adesão de*

- Revestimentos Poliméricos*, de Kerly Eliz Prodócimo, 10 - 14. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA: Prodócimo, Kerly Eliz, 2008.
- Rijeza Metalurgia. “Revestimentos metalicos.” *Rijeza Metalurgia*. s.d. <http://www.rijeza.com.br/produtos/revestimentos-contra-desgastes/revestimentos-metalicos> (acedido em Janeiro de 2014).
- Scielo. *Eclética Química*. 27 de Março de 2002. [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-46702002000200010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-46702002000200010&script=sci_arttext) (acedido em 22 de Maio de 2014).
- Silva, Magalhães, e Moura. “Capitulo-Teoria da adesão.” In *Juntas adesivas estruturais*, de António G. de Magalhães, Marcelo F. S. F. de Moura Lucas Filipe Martins da Silva, 11-30. Porto: Publindústria, 2007.
- Stachowiak e Batchelor. “Capítulo\_Adhesion and Adhesive Wear.” In *Engineering Tribology-2nd Ed*, de Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. Batchelor, 533-550. Butterworth Heinmann, 2000.
- Stoeterau, Rodrigo Lima. “Capítulo\_Mancais.” In *Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas*, de Rodrigo Lima Stoeterau, 59-60. Universidade Federal de Santa Catarina: Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.
- Sulcromo. “Tabela de comparação de coeficiente de atrito.” *Sulcromo-Revestimentos Industriais*. s.d. <http://www.sulcromo.com.br/sistemas/downloads/download.asp?arquivo=Tabela%20de%20Compara%E7%E3o%20-%20Coeficiente%20de%20Atrito.pdf>. (acedido em Janeiro de 2014).
- Sulzer. “High Velocity Oxygen (Liquid) Fuel Spray.” *Sulzer*. s.d. <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Coating-Equipment/Thermal-Spray/Processes/HVOF-Liquid-Fuel> (acedido em Janeiro de 2014).
- Tecém. “Metal Patente - Babbitt.” *tecem*. 2013. <http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2013/03/AB15-metal-patente-babbitt-tecem.pdf> (acedido em Fevereiro de 2014).
- Termomecânica São Paulo. “Recomendação para a escolha de ligas de bronze para mancais.” *Termomecânica*. Materiais Técnicos. s.d. <http://www.termomecanica.com.br/website/files/materiais-tecnicos/Cat%C3%A1logo%20do%20Bronze.pdf> (acedido em Dezembro de 2013).
- UAM. “ACEROS.” *ACEROS: ALEACIONES HIERRO-CARBONO*. s.d. <http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm#HIERRO> (acedido em 06 de Julho de 2014).
- Vassilaros, Michael G. “Naval ship research and development center.” *dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc*. May de 1976. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA024306> (acedido em 15 de Fevereiro de 2014).
- Wikipedia. *Coating*. 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Coating> (acedido em Dezembro de 2013).
- . *Piranha solution*. Dezembro de 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Piranha\\_solution](http://en.wikipedia.org/wiki/Piranha_solution) (acedido em Dezembro de 2014).